



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Diseño y análisis de edificaciones con aisladores de base tipo FPT

Trabajo de titulación, previo
a la obtención del título de
Ingeniero Civil

Director:

Ing. Francisco Xavier Flores Solano, PhD.
C.I: 0301547410

Autor:

Angel David Cango Puchaicela
C.I: 1105687311

Cuenca – Ecuador

Abril – 2018

Resumen

Diseñar estructuras que tengan capacidad de mitigar los efectos de los sismos en zonas de alta peligrosidad sísmica, como Ecuador, es requerido para evitar pérdidas económicas y de vidas humanas, en este sentido, se han venido desarrollando varias técnicas de protección sísmica, entre ellas está el uso de aisladores de base de tipo FPT, los cuales reducen la demanda sísmica en la estructura mediante un mecanismo pendular y friccional. Sin embargo, nuestra actual normativa no provee de lineamiento para diseñar estos sistemas de aislación, de ahí, la necesidad de generar documentos técnicos que faciliten el diseño y amplíen su uso. Por ello, este trabajo presenta a manera de guía, el diseño del sistema de aislación para un edificio de acero de 6 pisos usando aisladores FPT, además, se explica cómo realizar el análisis sísmico conforme la norma americana ASCE7-16. El diseño se realiza aplicando un procedimiento de análisis paramétrico que tiene como finalidad, relacionar las propiedades de los aisladores con sus respectivos parámetros de respuesta, esto se realiza usando el Software OpenSees. Por otro lado, el análisis sísmico se ejecuta usando los métodos estático y dinámico no lineal, este último se realiza usando el Software Etabs. Finalmente, se pudo encontrar que los aisladores FPT efectivamente logran reducir la demanda sísmica en una edificación, con lo cual se da la posibilidad de diseñar estructuras elásticas que no requieren incursionar en el rango inelástico, protegiendo de esta manera la integridad de la estructura y de sus ocupantes.

PALABRAS CLAVE: SISTEMA DE AISLACIÓN, AISLACIÓN BASAL, AISLADOR SÍSMICO, TRIPLE PÉNDULO DE FRICCIÓN (FPT), RESPUESTA SÍSMICA, ANÁLISIS NO LINEAL TIEMPO HISTORIA.

Abstract

Designing structures that have the capacity to mitigate the effects of earthquakes in areas of high seismic hazard, such as Ecuador, is required to avoid economic losses and human lives, in this sense, several seismic protection techniques have been developed, including the use of FPT type base isolators, which reduce the seismic demand in the structure through a pendular and frictional mechanism. However, our current regulations do not provide guidelines to design this isolation system, hence the need to generate technical documents that facilitate the design and expand its use. Therefore, this work presents as a guide, the design of the isolation system for a 6-story steel building using FPT isolators, and also explains how to perform the seismic analysis according to the American standard ASCE7-16. The design is carried out by applying a parametric analysis procedure whose purpose is to relate the properties of the isolators with their respective response parameters, this is done using the OpenSees Software. On the other hand, seismic analysis is carried out using static and non-linear dynamic methods, the latter is done using the Etabs Software. Finally, it was found that the FPT isolators effectively reduce the seismic demand in a building, which gives the possibility of designing elastic structures that do not require incursion into the inelastic range, thus protecting the integrity of the structure and its occupants.

KEYWORDS: ISOLATION SYSTEM, BASE ISOLATION, SEISMIC ISOLATOR, TRIPLE FRICTION PENDULUM (FPT), SEISMIC RESPONSE, NONLINEAR TIME HISTORY ANALYSIS.



Índice General

| | |
|---|-----------|
| Resumen | 1 |
| Abstract | 2 |
| Índice General..... | 3 |
| Índice de Figuras | 5 |
| Índice de Tablas | 8 |
| Capítulo 1: Introducción | 13 |
| 1.1 Antecedentes y justificación | 13 |
| 1.2 Objetivos..... | 14 |
| 1.2.1 Objetivo general | 14 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 14 |
| 1.3 Alcance | 14 |
| Capítulo 2: Aisladores de base | 15 |
| Capítulo 3: Sistema de péndulo de fricción | 17 |
| 3.1 Introducción..... | 17 |
| 3.2 Simple péndulo de fricción (SFP) | 21 |
| 3.3 Doble péndulo de fricción (DFP) | 24 |
| 3.3.2 Fase de movimiento I | 25 |
| 3.3.3 Fase de movimiento II | 26 |
| 3.4 Triple péndulo de fricción (FPT) | 28 |
| 3.4.2 Fase de movimiento I | 31 |
| 3.4.3 Fase de movimiento II | 33 |
| 3.4.4 Fase de movimiento III..... | 37 |
| 3.4.5 Fase de movimiento IV..... | 39 |
| 3.4.6 Fase de movimiento V | 41 |
| Capítulo 4: Diseño de aisladores FPT | 44 |
| 4.1 Introducción..... | 44 |
| 4.2 Objetivos de diseño | 45 |
| 4.3 Ubicación de aisladores | 46 |
| 4.4 Diseño preliminar | 49 |
| 4.4.1 Procedimiento de diseño preliminar | 50 |
| 4.5 Contacto con el fabricante | 58 |
| Capítulo 5: Análisis sísmico..... | 61 |
| 5.1 Introducción..... | 61 |
| 5.2 Terminología | 61 |
| 5.3 Capacidad de restitución..... | 63 |
| 5.4 Factores de modificación de propiedades | 64 |
| 5.5 Métodos de análisis | 65 |
| 5.5.1 Método de fuerza lateral equivalente (ELF) | 65 |
| 5.5.2 Método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA)..... | 69 |



| | |
|---|------------|
| Capítulo 6: Caso de estudio | 71 |
| 6.1 Introducción..... | 71 |
| 6.2 Información del proyecto..... | 71 |
| 6.2.1 Descripción del edificio..... | 71 |
| 6.2.2 Cargas del edificio..... | 73 |
| 6.2.3 Peligro sísmico | 74 |
| 6.2.4 Registros sísmicos | 75 |
| 6.3 Diseño del aislador FPT | 78 |
| 6.3.1 Objetivos de diseño | 78 |
| 6.3.2 Ubicación de aisladores | 78 |
| 6.3.3 Diseño preliminar | 79 |
| 6.3.4 Contactando con el fabricante | 92 |
| 6.4 Propiedades del aislador FPT8833 | 92 |
| 6.4.2 Propiedades “Lower Bound” y “Upper Bound” del sistema de aislación. | 93 |
| 6.5 Resumen de las Secciones 6.3 y 6.4 | 94 |
| 6.6 Análisis de fuerza lateral equivalente (ELF) | 95 |
| 6.6.2 Información para realizar el análisis..... | 96 |
| 6.6.3 Iteraciones..... | 96 |
| 6.6.4 Desplazamientos y cortantes basales de diseño..... | 99 |
| 6.7 Análisis no lineal tiempo historia (NLRHA)..... | 101 |
| 6.7.1 Acerca de Etabs | 101 |
| 6.7.2 Calculo de propiedades del elemento link “TPI” para modelar el FPT en Etabs | 103 |
| 6.7.3 Consideraciones para el análisis en Etabs | 107 |
| 6.7.4 Comprobaciones de modelación en Etabs | 107 |
| 6.7.5 Resultados NLRHA (Gráficos) | 109 |
| 6.7.6 Resultados NLRHA (Tablas)..... | 117 |
| 6.8 Requisitos mínimos del código..... | 121 |
| Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones | 124 |
| Bibliografía..... | 126 |
| Anexos..... | 129 |
| Anexo A: Demostración de las ecuaciones de la Sección 3.4 | 129 |
| Anexo B: Resultados de los múltiples NLRHA desarrollados en OpenSees | 135 |
| Anexo C: Análisis sísmico | 138 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Respuesta sísmica de un edificio convencional y de un edificio protegido con aislación sísmica (Skinner, Robinson, & McVerry, 1993) | 15 |
| Figura 2.2 Reducción de las aceleraciones espectrales en un edificio con aislamiento sísmico (SEAOC, 2014) | 16 |
| Figura 3.1 Modelo con aisladores FPS ensayado por EERC (Zayas et al., 1987) | 17 |
| Figura 3.2 Principio de funcionamiento de aisladores FPS a) péndulo convencional y b) péndulo de fricción (Iqbal, 2006) | 18 |
| Figura 3.3 Tipos de aisladores FPS a) simple, b) doble y c) triple péndulo de fricción (EPS, 2017; Fenz & Constantinou, 2008b)..... | 19 |
| Figura 3.4 Función de la articulación en aisladores FPS (Amaral & Guerreiro, 2014) | 19 |
| Figura 3.5 Importancia del anillo de retención en aisladores FPS. a) sin anillo b) con anillo (Zayas et al., 2016) | 20 |
| Figura 3.6 Partes principales del aislador SFP. Adaptado de (Aguilar et al., 2008) | 21 |
| Figura 3.7 Aislador SFP a) Posición deformada b) diagrama de cuerpo libre. Adaptado de (Fenz & Constantinou, 2008b) | 22 |
| Figura 3.8 Curva de histéresis del aislador SFP. Adaptado de (Fenz & Constantinou, 2008b) ... | 23 |
| Figura 3.9 Partes principales del aislador DFP. Adaptado de (Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault, & Lay, 2011)..... | 24 |
| Figura 3.10 Fase I del aislador DFP a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre. Adaptado de (Fenz & Constantinou, 2006) | 25 |
| Figura 3.11 Fase II del aislador DFP. Adaptado (Fenz & Constantinou, 2008b) | 26 |
| Figura 3.12 Curva de histéresis del aislador de DFP (Constantinou, 2004)..... | 27 |
| Figura 3.13 Partes principales y nomenclatura del aislador FPT (McVitty & Constantinou, 2015) | 28 |
| Figura 3.14 Relación fuerza-desplazamiento monotónica del aislador FPT. Adaptado de (Sarlis & Constantinou, 2013) | 30 |
| Figura 3.15 Fase I del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre (Fenz & Constantinou, 2008a)..... | 31 |
| Figura 3.16 Curva de histéresis de la fase I del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008a).... | 33 |
| Figura 3.17 Fase II del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre (Fenz & Constantinou, 2008a)..... | 34 |
| Figura 3.18 Equilibrio de fuerzas en la placa 2 | 35 |
| Figura 3.19 Curva de histéresis de la fase II del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008a) ... | 36 |
| Figura 3.20 Curva de histéresis de la fase III del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008a) .. | 38 |
| Figura 3.21 Fase IV del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre (Fenz & Constantinou, 2008a)..... | 40 |
| Figura 3.22 Curva de histéresis de la fase IV del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008a) .. | 41 |
| Figura 3.23 Curva de histéresis de la fase V del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008a) ... | 42 |
| Figura 4.1 Distribución de aisladores FPS - Tanque de Gas Natural construido en Grecia (EPS, 2017)..... | 47 |
| Figura 4.2 Distribución de aisladores FPS en una edificación que tiene muros y columnas (Sarkisian, Lee, Long, Shook, & Díaz, 2013) | 47 |
| Figura 4.3 Ubicación de la interfaz de aislación en estructuras con aisladores FPS (Zayas et al., 1990)..... | 48 |
| Figura 4.4 Estructura con la interfaz de aislación sobre columnas (Zayas et al., 1990) | 48 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.5 Interfaz de aislación ubicado entre la cimentación y la losa del primer piso - Hospital construido en EE. UU. (Mills Peninsula Hospital, 2017)..... | 49 |
| Figura 4.6 Simplificación de la estructura aislada a un modelo de 1GDL. Adaptado de (Tsai, Chiang, & Chen, 2005)..... | 50 |
| Figura 4.7 Implicación del periodo y coeficiente de fricción en el comportamiento de aisladores FPS (Zayas et al., 1990)..... | 55 |
| Figura 4.8 Nomenclatura del aislador FPT para calcular el tamaño del aislador..... | 58 |
| Figura 4.9 Ejemplo de la nomenclatura de EPS – FPT 15663/22-20/16-8 (Zayas et al., 2016) .. | 60 |
| Figura 5.1 Terminología del sistema de aislación (ASCE, 2016) | 62 |
| Figura 5.2 Terminología de desplazamientos (ASCE, 2016)..... | 62 |
| Figura 5.3 Fuerza de restitución en aisladores FPT que operan en la Fase III..... | 64 |
| Figura 6.1 Vista 3D | 71 |
| Figura 6.2 Planta típica..... | 72 |
| Figura 6.3 Elevación..... | 72 |
| Figura 6.4 Espectro de aceleraciones MCE - ASCE7-10..... | 75 |
| Figura 6.5 Espectros de respuesta elásticos SRSS de los 7 sismos y espectro MCE..... | 76 |
| Figura 6.6 Espectros SRSS escalados por SF_1 | 77 |
| Figura 6.7 Espectro “ <i>PROMEDIO7sismos x SF₁</i> ” escalado por $(SF_1 \times SF_2)$ | 77 |
| Figura 6.8 Espectros SRSS escalados en el rango de interés | 78 |
| Figura 6.9 Ubicación de aisladores a) vista isométrica b) vista en elevación | 79 |
| Figura 6.10 Ejemplo OpenSees: Curvas de histéresis - sismo RSN175..... | 83 |
| Figura 6.11 Ejemplo OpenSees: Desplazamientos tiempo-historia - sismo RSN175..... | 83 |
| Figura 6.12 Ejemplo OpenSees: Orbital de desplazamiento - sismo RSN175..... | 84 |
| Figura 6.13 Desplazamiento máximo vs. fricción superficies externas | 85 |
| Figura 6.14 Cortante basal normalizado vs. fricción superficies externas | 86 |
| Figura 6.15 Cortante basal normalizado vs. desplazamiento máximo | 86 |
| Figura 6.16 Cortante basal normalizado vs. desplazamiento máximo (para $\mu_1 < \mu_4$)..... | 89 |
| Figura 6.17 Geometría del aislador FPT8833 | 92 |
| Figura 6.18 Curva monotónica y de histéresis (en $DM = 16.0in$) del aislador FPT8833 para propiedades LB..... | 97 |
| Figura 6.19 Curvas de histéresis generadas al aplicar el método de análisis ELF, para propiedades LB y UB | 99 |
| Figura 6.20 Modelo en serie para representar el comportamiento del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008d)..... | 102 |
| Figura 6.21 Nomenclatura del aislador FPT en ETABS (Computers and Structures, 2016)..... | 102 |
| Figura 6.22 Ingreso de propiedades generales del elemento Link “TPI” en Etabs | 104 |
| Figura 6.23 Ingreso de propiedades en la dirección U1 del elemento Link “TPI”, en Etabs..... | 105 |
| Figura 6.24 Ingreso de propiedades en la dirección U2 y U3 del elemento Link “TPI”, en Etabs | 106 |
| Figura 6.25 Comparación entre la curva monotónica ELF con la generada en Etabs, para propiedades LB..... | 107 |
| Figura 6.26 Comparación entre el comportamiento histerético NLRHA y ELF para las propiedades a) LB y b) UB, sismo RSN1158..... | 108 |
| Figura 6.27 Resultados del sismo RSN175 para propiedades LB..... | 109 |
| Figura 6.28 Resultados del sismo RSN1158 para propiedades LB..... | 109 |
| Figura 6.29 Resultados del sismo RSN728 para propiedades LB..... | 110 |
| Figura 6.30 Resultados del sismo RSN864 para propiedades LB..... | 110 |



| | | |
|--------------------|--|-----|
| Figura 6.31 | Resultados del sismo RSN187 para propiedades LB | 111 |
| Figura 6.32 | Resultados del sismo RSN549 para propiedades LB | 111 |
| Figura 6.33 | Resultados del sismo RSN458 para propiedades LB | 112 |
| Figura 6.34 | Resultados del sismo RSN175 para propiedades UB | 112 |
| Figura 6.35 | Resultados del sismo RSN1158 para propiedades UB | 113 |
| Figura 6.36 | Resultados del sismo RSN728 para propiedades UB | 113 |
| Figura 6.37 | Resultados del sismo RSN864 para propiedades UB | 114 |
| Figura 6.38 | Resultados del sismo RSN187 para propiedades UB | 114 |
| Figura 6.39 | Resultados del sismo RSN549 para propiedades UB | 115 |
| Figura 6.40 | Resultados del sismo RSN458 para propiedades UB | 115 |
| Figura 6.41 | Orbitales de desplazamiento para propiedades a) LB y b) UB | 116 |
| Figura 6.42 | Desplazamiento vertical vs. tiempo para el aislador ubicado en el eje F5, UB | 120 |

Índice de Tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 3.1 Fases de movimiento del aislador FPT | 30 |
| Tabla 4.1 Parámetros de diseño para evitar daños y mantener funcional la estructura, los componentes no estructurales, y los contenidos, ante sismos MCE (Zayas & Mahin, 2010) | 45 |
| Tabla 4.2 Dimensiones estándar para placas cóncavas en aisladores FPS (Constantinou et al., 2011) | 52 |
| Tabla 5.1 Desplazamientos para diseño si se aplica el método de análisis ELF | 66 |
| Tabla 5.2 Factor de amortiguamiento (Tabla 17.5-1 del ASCE7-16) | 67 |
| Tabla 5.3 Contantes basales requeridos para diseño si se aplica el método de análisis ELF | 67 |
| Tabla 5.4 Límites de V_s , para diseño de la superestructura. | 68 |
| Tabla 5.5 Requisitos mínimos de diseño si se usa el método NLRHA | 70 |
| Tabla 6.1 Cargas actuantes en el edificio | 74 |
| Tabla 6.2 Parámetros del espectro de aceleraciones MCE | 74 |
| Tabla 6.3 Registros sísmicos seleccionados | 75 |
| Tabla 6.4 Factores de escala para los siete registros sísmicos | 78 |
| Tabla 6.5 Parámetros para ingresar en OpenSees (para $\mu_1 = \mu_4$) | 82 |
| Tabla 6.6 Ejemplo en OpenSees: Propiedades del FPT analizado | 83 |
| Tabla 6.7 Ejemplo en OpenSees: Desplazamientos máximos para cada uno de los siete sismos | 84 |
| Tabla 6.8 Selección de propiedades del aislador FPT | 87 |
| Tabla 6.9 Propiedades del nuevo aislador FPT elegido (FPT con 2 fricciones) | 88 |
| Tabla 6.10 Parámetros para ingresar en OpenSees (para $\mu_1 < \mu_4$) | 89 |
| Tabla 6.11 Parámetros del aislador FPT elegido (con 3 fricciones) | 90 |
| Tabla 6.12 Cálculo de las capacidades de desplazamiento | 91 |
| Tabla 6.13 Factores por envejecimiento y contaminación | 93 |
| Tabla 6.14 Factores por posibles variaciones en la fabricación y en los ensayos | 94 |
| Tabla 6.15 Coeficientes de fricción LB y UB del aislador FPT8833 | 94 |
| Tabla 6.16 Secuencia de cálculos para realizar el análisis sísmico ELF | 95 |
| Tabla 6.17 Resultados de aplicar el método de análisis ELF, para propiedades LB y UB | 98 |
| Tabla 6.18 Cortantes basales ELF para diseño | 100 |
| Tabla 6.19 Límites del cortante basal (V_s) para diseño de la superestructura | 100 |
| Tabla 6.20 Propiedades LB en las direcciones U2 y U3 del elemento Link “TPI”, en Etabs | 105 |
| Tabla 6.21 Propiedades UB en las direcciones U2 y U3 del elemento Link “TPI”, en Etabs | 106 |
| Tabla 6.22 Resultados del NLRHA: desplazamiento máximo (DM) | 117 |
| Tabla 6.23 Resultados del NLRHA: Cortantes basales (V_b) | 117 |
| Tabla 6.24 Resultados del NLRHA: Cortantes basales (V_s) | 118 |
| Tabla 6.25 Cargas axiales gravitacionales (kips) ($1.2D+1.6L$) | 119 |
| Tabla 6.26 Cargas axiales máximas en los aisladores (kips) ($1.2D+0.5L+ E_h + E_v$), UB | 119 |
| Tabla 6.27 Cargas axiales mínimas en los aisladores (kips) ($0.9D - E_h + E_v$), UB | 119 |
| Tabla 6.28 Desplazamiento máximo (DM) requerido para diseño | 121 |
| Tabla 6.29 Cortante basal (V_b) requerido para diseño | 122 |
| Tabla 6.30 Cortante basal (V_s) requerido para diseño | 123 |
| Tabla 6.31 Escalamiento de resultados del método NLRHA a los mínimos requeridos por el ASCE7-16 | 123 |



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Angel David Cango Puchaicela en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Diseño y Análisis de Edificaciones con Aisladores de Base Tipo FPT”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, abril de 2018

Angel David Cango Puchaicela
C.I: 1105687311



Cláusula de Propiedad Intelectual



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Angel David Cango Puchaicela, autor del Trabajo de Titulación “Diseño y Análisis de Edificaciones con Aisladores de Base Tipo FPT”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, abril de 2018

Angel David Cango Puchaicela
C.I: 1105687311



Dedicatoria

A mis padres, Rosa y Manuel, por el apoyo incondicional que me han brindado antes y durante mi formación académica. También, a mis hermanos y hermanas, que siempre han estado presentes.



Agradecimientos

Al Ing. Francisco Flores, Director de este Trabajo de Titulación, por el apoyo y orientación que he recibido durante el desarrollo de esta Tesis.

A los Ingenieros Patricio Paredes y Santiago Camino, mediante PLANPROCONS, por la información y el aprendizaje que he recibido.

A mis ex-compañeros de aula y futuros colegas.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Antecedentes y justificación

Los movimientos telúricos son una de las causas para que obras de infraestructura como edificaciones y puentes sean dañados parcial o totalmente y de manera súbita, causando pérdidas humanas y económicas. Mitigar estos efectos siempre ha sido un reto en el campo de la ingeniería sísmica que a lo largo de los años ha centrado su atención en la investigación y en el desarrollo de normativas y prácticas de diseño sismoresistente, los cuales han permitido diseñar estructuras con márgenes de seguridad adecuados.

Las normativas que han surgido, efectivamente han logrado reducir los efectos de los sismos, ya que, están basados en cumplir con objetivos de diseño sismoresistente que mejoran el desempeño de la estructura, en general estos objetivos son: evitar daños ante sismos frecuentes, permitir daños en componentes no estructurales ante sismos moderados y se admite el daño en componentes estructurales ante sismos severos (sin llegar a producirse el colapso) (De La Llera, Inaudi, & Lüder, 1998). Sin embargo, esta filosofía de diseño no puede ser usada en casos donde los objetivos de desempeño sísmico requieran proteger al mismo tiempo: elementos estructurales, no estructurales y en ciertos casos el contenido (el contenido hace referencia, por ejemplo, a equipos hospitalarios). Por tal razón, en la actualidad, existe otra tendencia de diseño sismoresistente.

La tendencia actual se centra en mejorar la respuesta de las estructuras mediante la aplicación de diferentes técnicas de diseño sísmico tales como el aislamiento basal y la disipación de energía (De La Llera et al., 1998). El aislamiento basal o aislamiento sísmico permite desacoplar la estructura del suelo, a través de la incorporación de aisladores en la parte inferior de la edificación. El aislamiento sísmico incrementa el periodo y el amortiguamiento de la estructura, reduciendo las aceleraciones espectrales (reducción de la demanda sísmica) en la edificación. Entre los aisladores sísmicos más usados están los elastoméricos con núcleo de plomo (LRB, por sus siglas en inglés) y los de péndulo de fricción (FPS, por sus siglas en inglés).

En el caso de los aisladores FPS, existen tres tipos: *simple péndulo*, *doble péndulo* y *triple péndulo de fricción (FPT)*. Todos bajo el mismo principio de funcionamiento, basados en el movimiento de un péndulo convencional. De los tres tipos de aisladores, el triple péndulo de fricción es el más reciente y el más utilizado debido a que posee múltiples ventajas respecto al simple y doble péndulo de fricción. Entre las ventajas están: la reducción de las dimensiones en planta (diseño más compacto) y la posibilidad de ser diseñado para diferentes objetivos de desempeño sísmico (Fenz & Constantinou, 2008a).

Los aisladores de triple péndulo de fricción (FPT) ya han sido ampliamente utilizados en países como Estados Unidos, Perú, y se están empezando a incorporar en Ecuador. Estos dispositivos se han utilizado en la aislación sísmica de estructuras de puentes y de edificaciones. En el caso de Ecuador, estructuras con aisladores FPT, como el puente que une San Vicente con Bahía de Caráquez, que tuvo un desempeño satisfactorio en el sismo de Pedernales registrado en abril de 2016 (ATC, 2016), motivan a usar con más frecuencia este sistema de aislación sísmica.

Sin embargo, para el uso de estos sistemas de aislación se requiere de una normativa y en general nuestra actual normativa no provee de lineamientos para el diseño de sistemas de aislación sísmica. De ahí, la inminente necesidad de generar documentos técnicos de diseño y normativas que permitan ampliar el uso de los aisladores FPT. Por lo que se ha visto conveniente realizar a manera de guía, el diseño del sistema de aislación (con aisladores FPT) para un edificio de acero de 6 pisos conforme a la norma americana ASCE7-16, ilustrando de esta manera el procedimiento a seguir.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar el sistema de aislación para un edificio de acero de 6 pisos usando aisladores de triple péndulo de fricción (FPT) y realizar el análisis sísmico (estático y dinámico) de acuerdo a la norma ASCE7-16.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Presentar la base teórica y las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los aisladores FPT.
- ✓ Establecer criterios y presentar un procedimiento de diseño de aisladores FPT.
- ✓ Aplicar los aisladores FPT a un edificio de acero de 6 pisos.
- ✓ Realizar el análisis sísmico del edificio con los aisladores FPT diseñados, usando el método de fuerza lateral equivalente (estático) del ASCE7-16.
- ✓ Realizar el análisis sísmico del edificio con aisladores FPT diseñados, usando el método no lineal tiempo historia (dinámico) del ASCE7-16, usando Etabs.
- ✓ Exponer los beneficios obtenidos al insertar los aisladores en el edificio.

1.3 Alcance

Este trabajo de titulación se centra en dos puntos concretos, el diseño y el análisis sísmico de sistemas de aislación usando aisladores FPT.

En el diseño se trata específicamente de elegir las propiedades principales que debe tener el aislador (esto es: radios de curvatura y coeficientes de fricción), así como también el tamaño que debe tener el aislador hablando en términos de capacidad de desplazamiento. El dimensionamiento del aislador, para tenga suficiente capacidad axial, no se aborda en este documento, únicamente se realiza un cálculo aproximado para poder realizar los análisis sísmicos, aclarando que la capacidad axial no afecta el comportamiento del sistema de aislación.

Por otro lado, el análisis sísmico se enfoca en dos métodos del ASCE7-16, el método de fuerza lateral equivalente (ELF) y el método no lineal tiempo historia (NLRHA). Con los análisis sísmicos se pretende comparar si el aislador diseñado tiene la capacidad de desplazamiento suficiente para acomodar los movimientos sísmicos, además, de los análisis sísmicos, se determinará los cortantes basales de diseño (para el sistema de aislación y para la superestructura), y las fuerzas axiales que llegan a los aisladores.

Capítulo 2: Aisladores de base

Los aisladores de base son dispositivos que producen una discontinuidad en la estructura en cuestión, generando un piso débil en donde se concentran las deformaciones producidas por el sismo. Esto se da porque los aisladores de base poseen baja rigidez horizontal. Además, los aisladores de base permiten disipar energía producto del mecanismo propio de cada aislador.

En la Figura 2.1 se muestra el efecto que produce la inserción de aisladores sísmicos en un edificio. Se compara un edificio convencional y un edificio sísmicamente aislado, en donde en el primer caso las deformaciones producidas por el sismo se distribuyen en los elementos estructurales del edificio que son los que disipan la energía, mientras que, en el segundo caso las deformaciones se concentran en el sistema de aislación el cual a su vez se encargan de disipar energía.

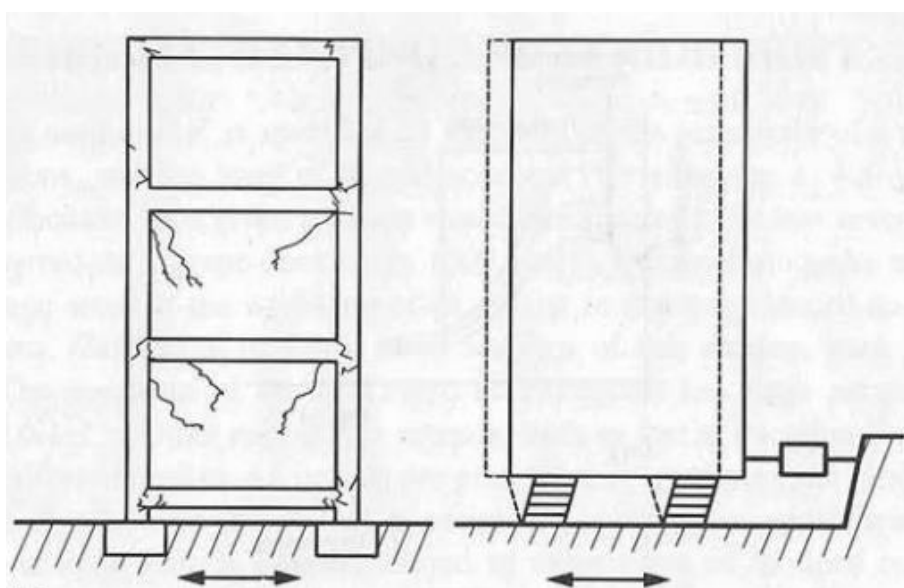


Figura 2.1 Respuesta sísmica de un edificio convencional y de un edificio protegido con aislación sísmica (Skinner, Robinson, & McVerry, 1993)

En pocas palabras, el aislamiento sísmico provoca el incremento del periodo de vibración de la estructura y del amortiguamiento. Estas dos características hacen que se reduzca la respuesta sísmica de la estructura, tal como se muestra en la Figura 2.2, en el que se visualiza que las aceleraciones espectrales se reducen enormemente al alargar el periodo de la estructura (period shift), así como también se reducen las aceleraciones espectrales como consecuencia del incremento del amortiguamiento (SEAOC, 2014).

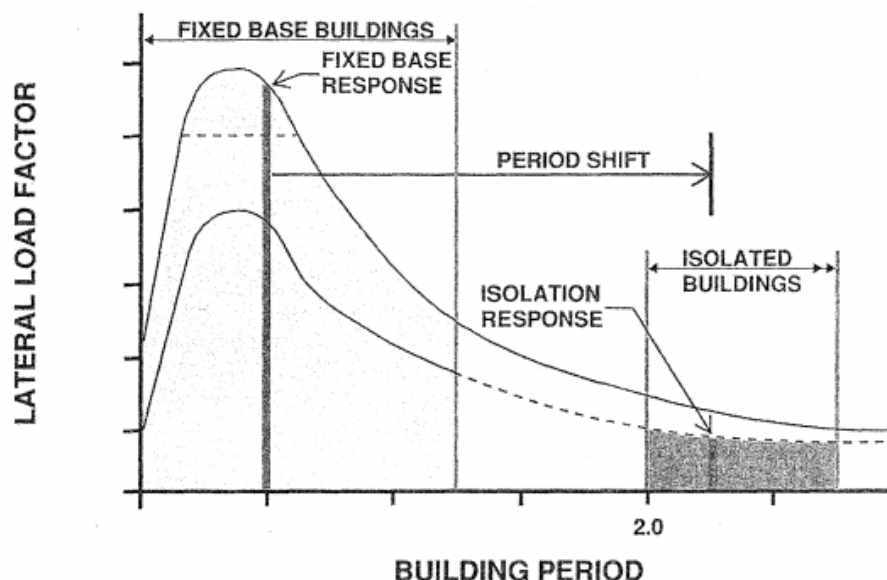


Figura 2.2 Reducción de las aceleraciones espectrales en un edificio con aislamiento sísmico (SEAOC, 2014)

Pero no siempre una estructura sísmicamente aislada responde con las propiedades de estructura aislada. En realidad existen dos estados en el comportamiento, una fase estática y una fase dinámica (Amaral & Guerreiro, 2014). En la fase estática la estructura no experimenta excitación sísmica o bien la excitación sísmica es muy leve que no activa el sistema de aislamiento y por lo tanto la estructura se comporta como una de base fija (empotrada); mientras que en la fase dinámica la estructura responde con el periodo de estructura aislada, es decir la respuesta dinámica es controlada por las propiedades del aislador (Amaral & Guerreiro, 2014; Mokha, Amin, Constantinou, & Zayas, 1996).

En la actualidad, existen 2 tipos principales de aisladores de base, los LRB (Lead Rubber Bearing) y los FPS (Friction Pendulum System), cada uno con principios de funcionamiento y mecanismos de disipación de energía diferentes. En el caso de FPS, existen 3 tipos de aisladores, el simple, doble y triple péndulo de fricción.

El aislador de triple péndulo de fricción (FPT) es el tratado en este trabajo de titulación. Sin embargo, también se habla sobre los aisladores de simple y doble péndulo de fricción debido a su importancia en el proceso de entendimiento del aislador de triple péndulo de fricción.

Capítulo 3: Sistema de péndulo de fricción

3.1 Introducción

El sistema de péndulo de fricción (FPS) fue introducido en 1986 por Earthquake Protection System (EPS) en California. Varias investigaciones se llevaron a cabo con el afán de demostrar que el FPS podía ser usado para aislar sísmicamente una estructura. Una de estas investigaciones fue desarrollado por Earthquake Engineering Research Center (EERC) de la universidad de California, Berkeley en 1986 (Iqbal, 2006).

El estudio realizado por EERC, presentado en (Zayas, Low, & Mahin, 1987) consistió en ensayar 4 modelos a escala reducida de 2 pisos que tenían periodos de la súper-estructura de 0.30 a 3 segundos. Estos modelos se montaron sobre 4 aisladores FPS (ver Figura 3.1). Esto permitió determinar la efectividad de los aisladores FPS para diferentes periodos de la superestructura (diferentes alturas de edificios). Además, en los experimentos se modificó la excentricidad del centro de masa del segundo piso (de 0%, 10%, 15% y 45%) con la finalidad de ver el comportamiento ante efectos de torsión en planta.

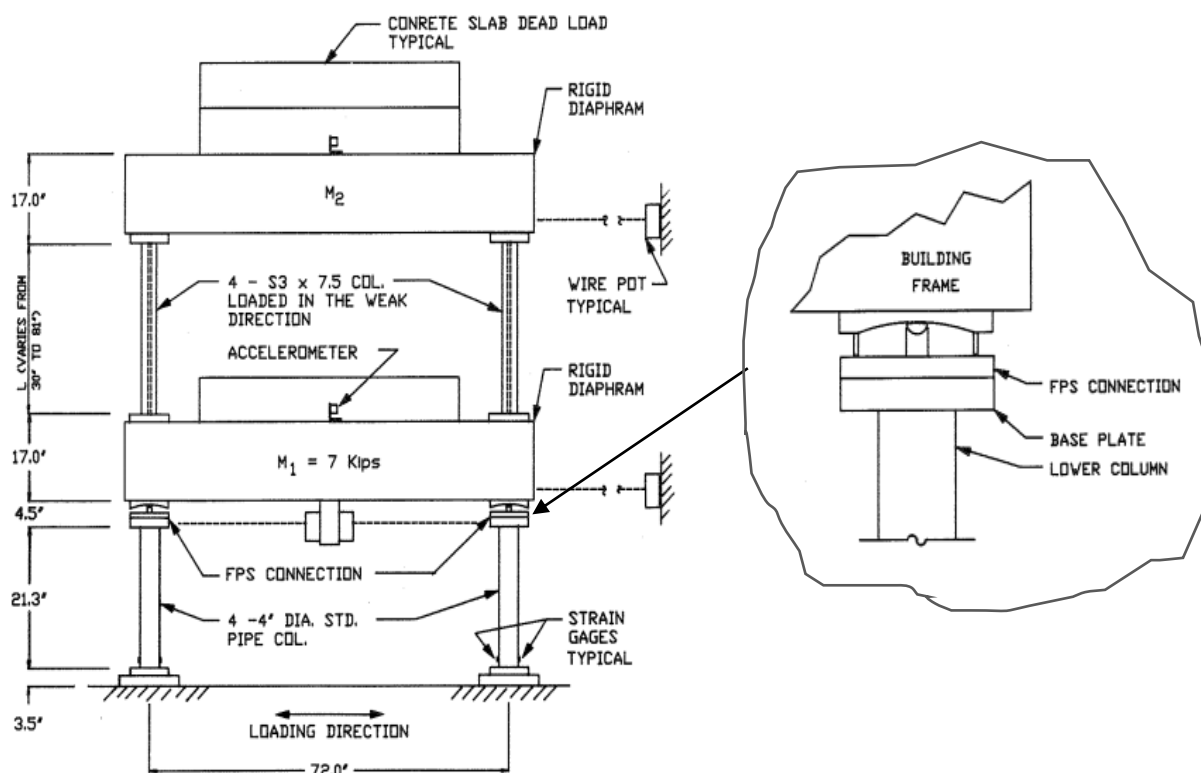


Figura 3.1 Modelo con aisladores FPS ensayado por EERC (Zayas et al., 1987)

De este, y otros experimentos, se demostró que los aisladores FPS podían ser usados como alternativa de aislación sísmica. Además, se encontró una propiedad inherente de los aisladores

FPS, que fue el de reducir o eliminar la torsión en planta a pesar de tener masas excéntricas en los modelos (Zayas, Low, & Mahin, 1990).

Los aisladores FPS logran los objetivos de aislación sísmica principalmente por su configuración geométrica. Configuración geométrica que permite liberar y concentrar las deformaciones producidas por el sismo, esto se da cuando el deslizador se activa y se mueve a lo largo de una superficie cóncava (ver Figura 3.2b). El movimiento del deslizador es similar al movimiento de una masa suspendida (péndulo convencional), esto hace que el comportamiento de los aisladores FPS se fundamente en el principio de movimiento de un péndulo convencional (Zayas et al., 1990). La Figura 3.2 muestra la analogía entre el movimiento de un péndulo convencional y del sistema de péndulo de fricción (FPS).

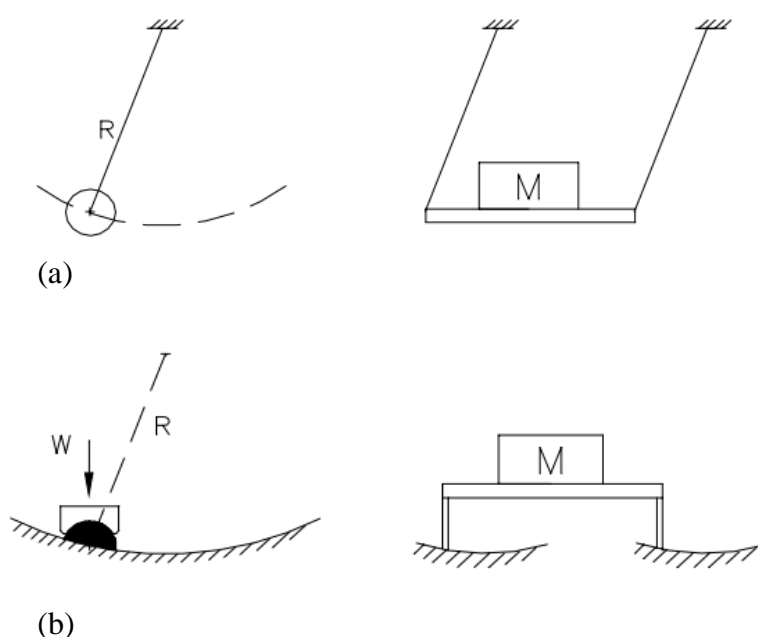


Figura 3.2 Principio de funcionamiento de aisladores FPS a) péndulo convencional y b) péndulo de fricción (Iqbal, 2006)

Luego de la invención del sistema de péndulo de fricción (FPS), originalmente el *simple péndulo de fricción* (usado por EERC para los estudios realizados en 1986), surgen dos variantes del aislador de simple péndulo, que se basan principalmente en aumentar la cantidad de mecanismos pendulares a dos y tres en un mismo aislador, estas variantes son catalogadas como aisladores de *doble* y *triple péndulo de fricción*. A estos tres tipos de aisladores también se los denomina como FPS de primera, segunda y tercera generación, respectivamente.

En la Figura 3.3 se muestran los tres tipos o generaciones de aisladores FPS. El aislador de *simple péndulo de fricción* (Figura 3.3a) posee una placa cóncava y un deslizador articulado; el de *doble péndulo de fricción* (Figura 3.3b) tiene 2 placas cóncavas y un deslizador articulado; y el *triple péndulo de fricción* (Figura 3.3c) está formado por cuatro placas cóncavas y un deslizador rígido.

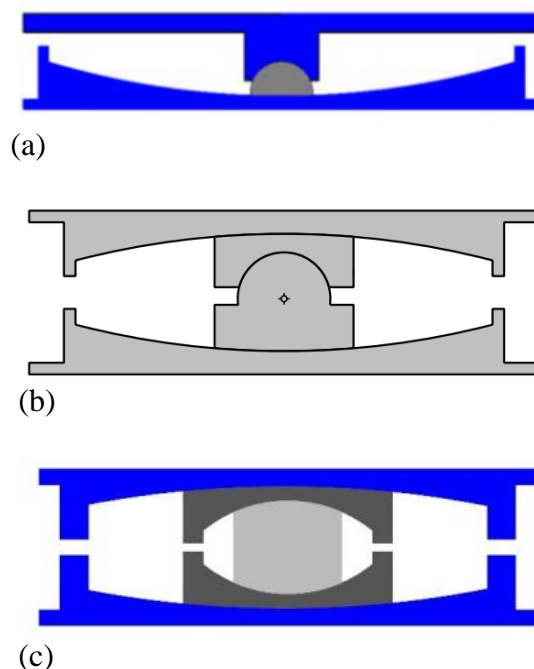


Figura 3.3 Tipos de aisladores FPS a) simple, b) doble y c) triple péndulo de fricción (EPS, 2017; Fenz & Constantinou, 2008b)

Las articulaciones de los deslizadores (evidentes en el simple y doble péndulo de fricción), tienen la función de mantener la edificación en posición vertical y de distribuir uniformemente la presión provocada por las cargas (Constantinou, 2004). En el caso del aislador de triple péndulo, el ensamble de las tres partes internas (dos placas internas y el deslizador rígido), hace las veces de articulación, esto debido a las rotaciones relativas entre ellos. En la Figura 3.4 se muestra un aislador de simple péndulo (similar para el doble y triple) con y sin articulación, el cual demuestra claramente la importancia de la articulación.



Figura 3.4 Función de la articulación en aisladores FPS (Amaral & Guerreiro, 2014)

En los tres tipos de aisladores también se identifica un anillo de retención en los bordes de cada superficie cóncavas. Como es de esperarse estos anillos juegan un papel importante ya que mejoran la seguridad (menos probabilidad de colapso) de los aisladores para sismos más allá del considerado en el diseño (Zayas, Mahin, & Constantinou, 2016). Debido a su importancia también se lo denomina como “*anillo de seguridad*”. La importancia del anillo de seguridad se visualiza

mejor en la secuencia de imágenes de la Figura 3.5 en donde, en el primer caso (Figura 3.5a) se muestra el colapso de una estructura que tiene aisladores sin el anillo de seguridad, y el segundo caso (Figura 3.5b) se muestra como se ha evitado el colapso por contar con los mismos.

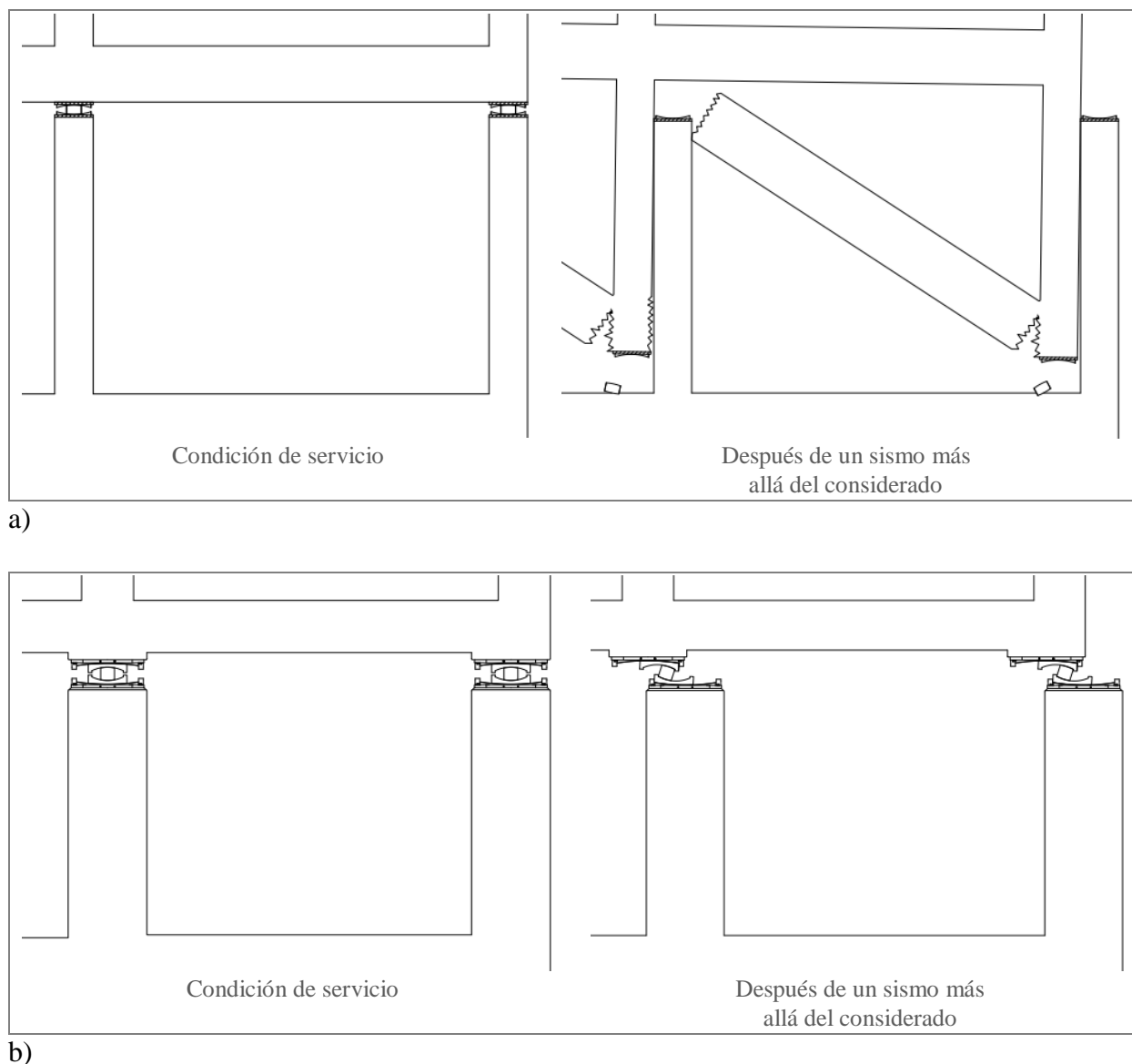


Figura 3.5 Importancia del anillo de retención en aisladores FPS. a) sin anillo b) con anillo (Zayas et al., 2016)

Por otro lado, se sabe que el comportamiento de los aisladores FPS depende de la relación fuerza-desplazamiento (curva de histéresis) el cual es función de los parámetros geométricos y mecánicos (coeficientes de fricción) del aislador, por esta razón en las secciones 3.2, 3.3 y 3.4 se realiza la demostración de la relación fuerza-desplazamiento para los aisladores de simple, doble y triple péndulo de fricción. Sin embargo, las demostraciones para los aisladores de simple y doble péndulo de fricción se realizan únicamente para introducir y mejorar la comprensión del funcionamiento del aislador de triple péndulo de fricción. De esta manera se prepara para los siguientes capítulos, dedicados al diseño y análisis de aisladores de triple péndulo de fricción.

3.2 Simple péndulo de fricción (SFP)

El aislador de simple péndulo de fricción (SFP, Single Friction Pendulum) (Figura 3.6) está formado por un deslizador articulado que descansa sobre una superficie cóncava de acero inoxidable. El deslizador contiene en su base una capa de material PTFE (teflón) que tiene un coeficiente de fricción bajo (Aguilar, Almazán, Dechent, & Suárez, 2008). En los bordes se encuentra el anillo de retención. Además, existe un material sellante que hermetiza la parte interna del aislador y de esta manera se evita la contaminación y deterioro de los componentes ante efectos ambientales.

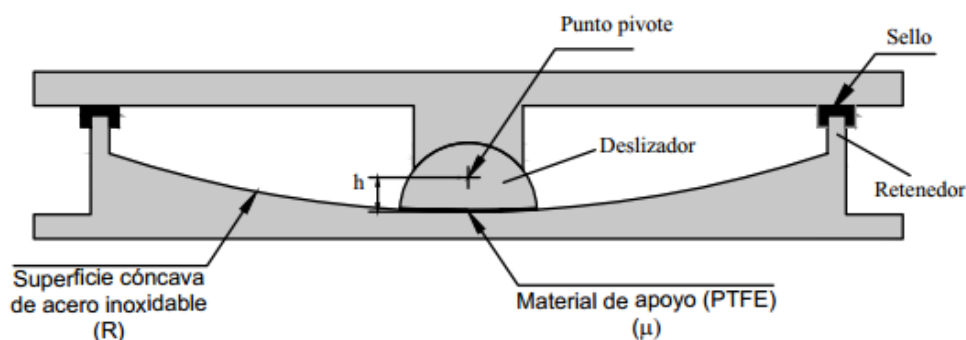


Figura 3.6 Partes principales del aislador SFP. Adaptado de (Aguilar et al., 2008)

Dos parámetros gobiernan el comportamiento del aislador SFP: la fricción que existe en la base del deslizador (μ) y el radio de curvatura de la superficie cóncava (R). La fricción permite disipar la energía y el radio de curvatura incrementa el periodo de vibración de la estructura. Esto se demuestra a continuación:

Relación fuerza-desplazamiento

La Figura 3.7a muestra al aislador SFP en la posición deformada y la Figura 3.7b muestra el diagrama de cuerpo libre, el cual se usa para demostrar la relación fuerza-desplazamiento. Además, en la Figura 3.7b, se identifica la siguiente nomenclatura:

R : Radio de curvatura de la superficie cóncava.

h : Altura desde la base del deslizador al punto pivote (ver Figura 3.6).

R_{ef} : Radio de curvatura efectivo de la superficie cóncava, $R_{ef} = R - h$ (**)

θ : Angulo de rotación del deslizador.

W : Carga sobre el aislador.

F : Fuerza horizontal (fuerza sísmica).

F_f : Fuerza de fricción, $F_f = \mu W$.

S : Fuerza normal.

t_f : Fuerza de tracción en la superficie de rotación del deslizador. Sus efectos son asumidos como parte de la fuerza de fricción, F_f . (Fenz & Constantinou, 2008b)

** Existe la posibilidad que el aislador SFP tenga el punto pivote fuera del límite de la superficie cóncava, en tal caso, el radio efectivo debe ser calculado como $R_{ef} = R + h$ (Fenz & Constantinou, 2008b).

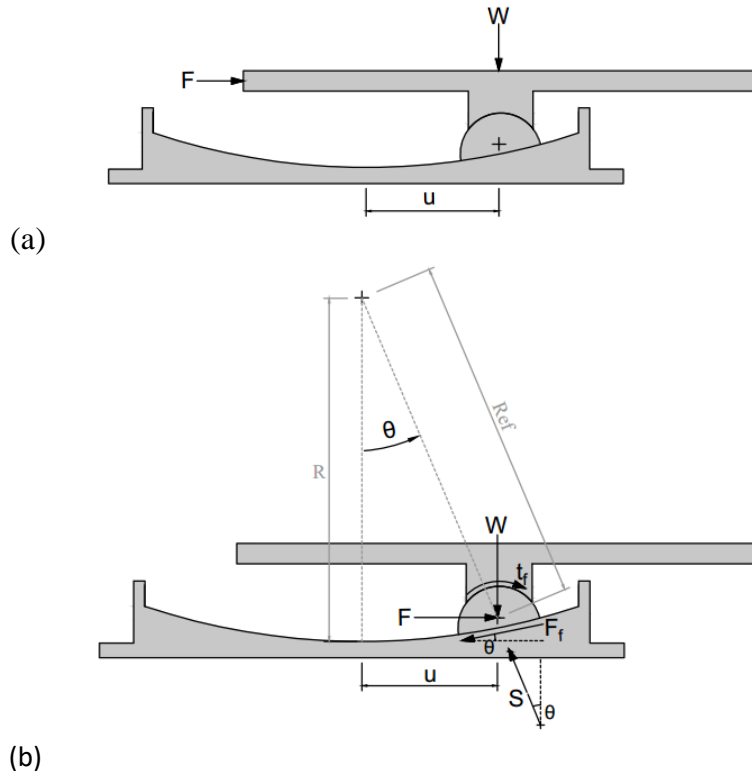


Figura 3.7 Aislador SFP a) Posición deformada b) diagrama de cuerpo libre. Adaptado de (Fenz & Constantinou, 2008b)

Haciendo equilibrio de fuerzas, se tiene:

$$\sum F_x = 0 \quad \rightarrow \quad F - S \cdot \sin(\theta) - F_f \cdot \cos(\theta) = 0 \quad (3.1a)$$

$$\sum F_y = 0 \quad \rightarrow \quad S \cdot \cos(\theta) - W - F_f \cdot \sin(\theta) = 0 \quad (3.1b)$$

Por geometría, el desplazamiento horizontal (u) viene dado por:

$$u = R_{ef} \cdot \sin(\theta) \quad (3.2)$$

Despejando S de la ecuación (3.1a),

$$S = \frac{F - F_f \cdot \cos(\theta)}{\sin(\theta)} \quad (3.3)$$

Remplazando S de la ecuación (3.3), en la ecuación (3.1b) y despejando F ,

$$\begin{aligned} \frac{F - F_f \cdot \cos(\theta)}{\sin(\theta)} \cdot \cos(\theta) - W - F_f \cdot \sin(\theta) &= 0 \\ F &= W \cdot \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)} + \frac{F_f}{\cos(\theta)} = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Ahora se remplaza $\sin(\theta) = u/R_{ef}$ de la ecuación (3.2), en la ecuación (3.4),

$$F = W \cdot \frac{u/R_{ef}}{\cos(\theta)} + \frac{F_f}{\cos(\theta)}$$

En general el radio de curvatura (R), es relativamente mayor al desplazamiento horizontal (u) por lo que se puede asumir que $\cos(\theta) \approx 1$ (Fenz & Constantinou, 2008b)

$$F = \frac{W}{R_{ef}}u + F_f \quad (3.5)$$

en el que (W/R_{ef}) es la rigidez (K_b) del aislador SFP

El primer término de la ecuación 3.5, representa la fuerza de restauración por efecto de la gravedad, y el segundo término es la componente de disipación de energía. (Fenz & Constantinou, 2008b; Mokha et al., 1996).

Se nota que la rigidez (K_b) es directamente proporcional a la carga (W), esto implica que el centro de rigidez del sistema de aislación coincide con el centro de masa de la estructura y por lo tanto permite minimizar los movimientos torsionales en las estructuras (Zayas et al., 1987, 1990). Esta propiedad solo se atribuye a los sistemas de péndulo de fricción.

De la ecuación 3.5 se deriva la relación fuerza-desplazamiento o curva de histéresis para el aislador SFP, esto se muestra en la Figura 3.8.

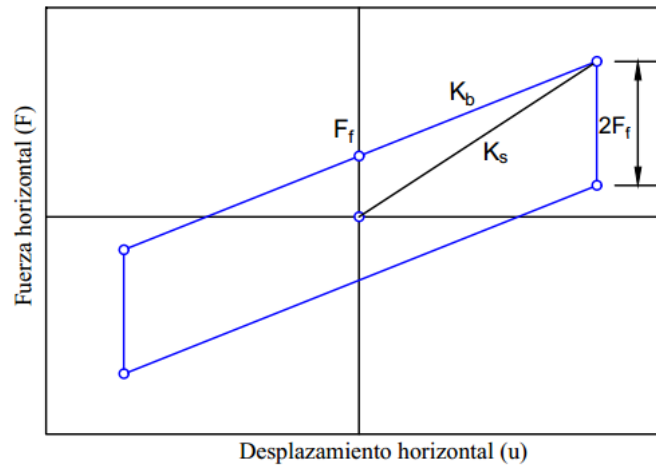


Figura 3.8 Curva de histéresis del aislador SFP. Adaptado de (Fenz & Constantinou, 2008b)

El periodo de vibración se determina usando la ecuación de movimiento armónico simple:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi / \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Remplazando la rigidez ($K = K_b$) y la masa ($m = W/g$) en la ecuación anterior, se tiene:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{R_{ef}}{g}} \quad (3.6)$$

Esto demuestra que el periodo de una estructura aislada con aisladores SFP, y en general para los FPS, solo depende del radio de curvatura efectivo, esto quiere decir que se puede ajustar el periodo objetivo eligiendo únicamente un radio efectivo. Por ejemplo, para un periodo objetivo de 2.0 seg. el radio de curvatura debe ser de 39 in (≈ 100 cm).

Como consecuencia de lo anterior también se concluye que el comportamiento de los sistemas FPS no depende de la carga.

3.3 Doble péndulo de fricción (DFP)

El aislador de doble péndulo de fricción (DFP, Double Friction Pendulum) está formado por dos placas con superficies cóncavas de acero inoxidable, y de un deslizador articulado, tal como se muestra en la Figura 3.9. La superficie cóncava inferior, con radio de curvatura R_1 , coeficiente de fricción μ_1 y capacidad de desplazamiento d_1 ; y la superficie cóncava superior con radio de curvatura R_2 , coeficiente de fricción μ_2 y capacidad de desplazamiento d_2 .

El radio efectivo para cada superficie cóncava, se define como:

$$R_{efi} = R_i - h_i \quad (\text{para } i = 1, 2)$$

Las alturas h_1 y h_2 se miden desde el punto pivote hasta la parte inferior y superior del deslizador (no desplazado), respectivamente.

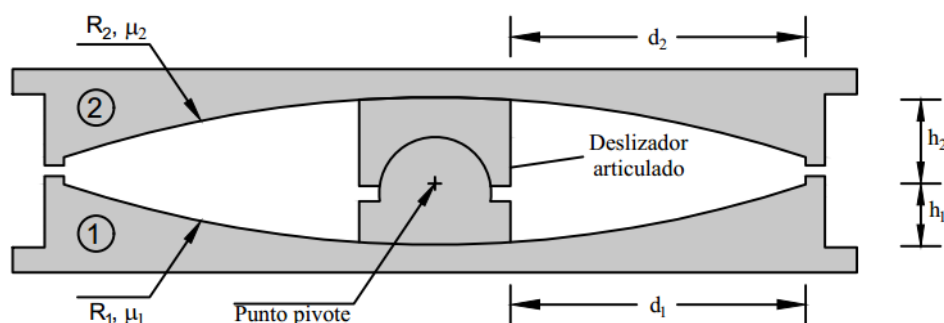


Figura 3.9 Partes principales del aislador DFP. Adaptado de (Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault, & Lay, 2011)

Se identifican dos ventajas principales del aislador DFP respecto al aislador SFP; el primero es la reducción de las dimensiones en planta, esto a razón de que la capacidad de desplazamiento viene a ser la combinación de la capacidad de desplazamiento de dos placas (Constantinou, 2004; Malekzadeh & Taghikhany, 2010); y segundo la posibilidad optimizar el diseño para dos valores de demanda sísmica, ya que el aislador posee dos péndulos que pueden cambiar de rigidez y amortiguamiento con el incremento de la demanda sísmica (Malekzadeh & Taghikhany, 2010).

Una combinación frecuente de los parámetros $R_1, R_2, h_1, h_2, \mu_1, \mu_2$ que normalmente se usa para aplicaciones en ingeniería, es tal que: $R_1 = R_2, h_1 = h_2$ y $\mu_1 < \mu_2$, a esta configuración se la denomina *estándar* (Constantinou, 2004).

A continuación se determina la relación fuerza-desplazamiento de un aislador DFP configurado de manera *estándar*.

En un aislador *DFP estándar* se identifican dos fases de movimiento. En la primera fase el deslizador se mueve únicamente a lo largo de la superficie 1 y en la segunda fase el deslizador se mueve simultáneamente en las dos superficies. Esto se detalla seguidamente:

3.3.2 Fase de movimiento I

La fase I inicia cuando la fuerza horizontal (F) supera la fuerza de fricción en la superficie 1 (F_{f1}) (menor coeficiente de fricción). En esta fase, el deslizador se desliza solo en la superficie 1 (placa 1), permaneciendo fijo en la superficie 2 (placa superior). La posición deformada se muestra en la Figura 3.10a y el diagrama de cuerpo libre se muestra en la Figura 3.10b.

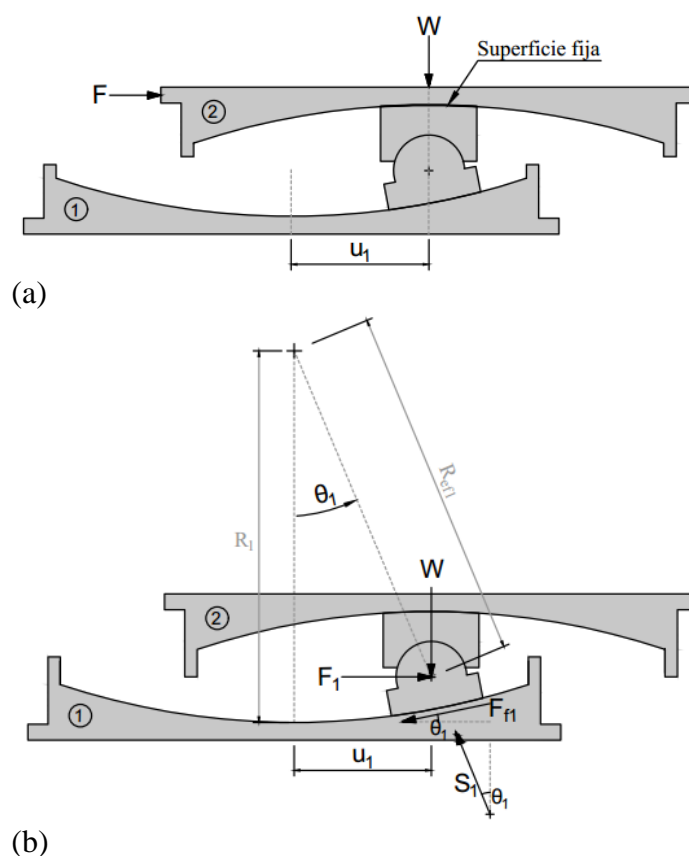


Figura 3.10 Fase I del aislador DFP a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre.
Adaptado de (Fenz & Constantinou, 2006)

En la Figura 3.10b, se identifica la siguiente nomenclatura:

- R_{ef1} : Radio de curvatura efectivo de la superficie 1.
- θ_1 : Ángulo de rotación del deslizador respecto a la superficie 1.
- W : Carga sobre el aislador.
- F : Fuerza horizontal.

F_{f1} : Fuerza de fricción en la superficie 1 ($F_{f1} = \mu_1 W$).

S_1 : Fuerza normal en la superficie 1.

Al observar la Figura 3.10 y la Figura 3.7 (del aislador SFP), se nota que el diagrama de cuerpo libre del aislador DFP es el mismo que del aislador SFP. Por lo tanto, la ecuación que gobierna el comportamiento para la fase I del aislador DFP es el mismo que del aislador SFP (esto es: igual a la ecuación 3.5), pero con radio efectivo R_{ef1} y coeficiente de fricción μ_1 , esto nos da:

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} u_1 + F_{f1} \quad (3.7)$$

En donde:

$$u_1 = (R_{ef1}) \cdot \sin(\theta_1) \quad (3.8)$$

3.3.3 Fase de movimiento II

La fase II empieza cuando la fuerza horizontal (F) supera la fuerza de fricción en la superficie 2 (F_{f2}). En esta fase se da el deslizamiento en la superficie 2, pero sin detenerse en la superficie 1, dando lugar deslizamiento simultáneo en las dos superficies cóncavas. En la Figura 3.11 se muestra el aislador DFP con deformación correspondiente a la fase II.

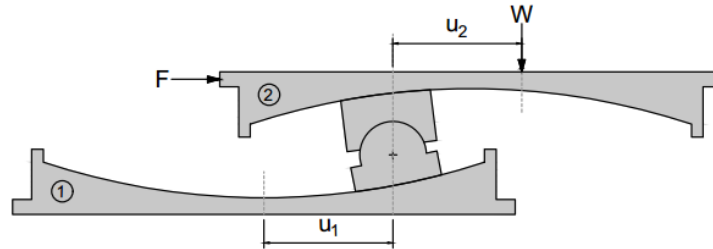


Figura 3.11 Fase II del aislador DFP. Adaptado (Fenz & Constantinou, 2008b)

La ecuación que gobierna el comportamiento en esta fase, se determina combinando el movimiento de las dos superficies cóncavas, tal como se muestra a continuación:

1. Para la superficie 1, la ecuación 3.7, aún sigue siendo válida, ya que el movimiento en esta superficie continúa igual que en la fase I.
2. La ecuación para la superficie 2 se determina realizando el correspondiente diagrama de cuerpo libre de la Figura 3.11. Sin embargo, no se ha realizado este diagrama de cuerpo libre, ya que sería similar al mostrado en la Figura 3.10b con la diferencia que estaría en posición invertida. Por lo tanto, se deduce directamente que la ecuación, para la superficie 2, es la siguiente:

$$F = \frac{W}{R_{ef2}} u_2 + F_{f2} \quad (3.9)$$

En donde:

$$u_2 = (R_{ef2}) \cdot \sin(\theta_2) \quad (3.10)$$

El deslizamiento ocurre simultáneamente en las superficies 1 y 2, por lo tanto, el desplazamiento total viene dado por:

$$u = u_1 + u_2 \quad (3.11)$$

Despejando u_1 y u_2 de las ecuaciones 3.7 y 3.9, respectivamente,

$$u_1 = (F - F_{f1}) \frac{R_{ef1}}{W} \quad (3.12a)$$

$$u_2 = (F - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \quad (3.12b)$$

Remplazando u_1 y u_2 de las ecuaciones 3.12a y 3.12b, en la ecuación (3.11) y dejando en función de F ,

$$F = \frac{W}{R_{ef1} + R_{ef2}} u + \frac{F_{f1}R_{ef1} + F_{f2}R_{ef2}}{R_{ef1} + R_{ef2}} \quad (3.13)$$

La ecuación (3.13) representa la relación fuerza-desplazamiento para la segunda fase de movimiento.

El límite de desplazamiento (u^*) entre la primera y la segunda fase ocurre cuando la fuerza horizontal (F) coincide con la fuerza de fricción (F_{f2}). Por lo tanto, este límite de desplazamiento puede ser determinado haciendo $F = F_{f2}$ en la ecuación (3.7) o (3.13) (las dos ecuaciones contienen a F_{f2}), dando la siguiente igualdad:

$$u^* = (\mu_2 - \mu_1)R_{ef1} \quad (3.14)$$

Con las relaciones fuerza-desplazamiento de la primera y segunda fase (ecuación 3.7 y 3.13) se grafica la curva de histéresis del aislador DFP, esto se muestra en la Figura 3.12. Se debe notar que la fuerza horizontal (F) de la Figura 3.12 ha sido normalizada a la carga (W) por lo que se visualiza μ_1 y μ_2 en vez de F_{f1} y F_{f2} , respectivamente, sabiendo que $F_{fi} = \mu_i W$.

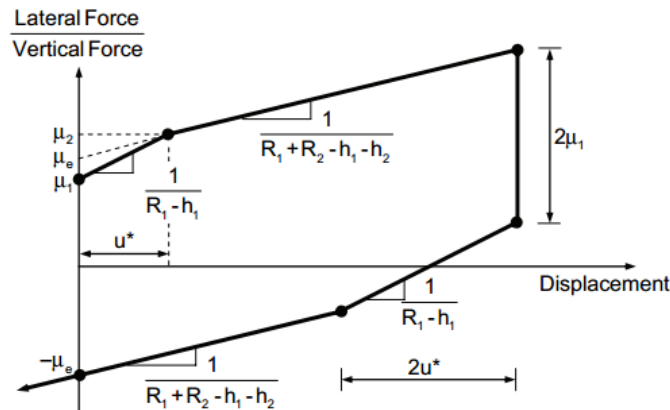


Figura 3.12 Curva de histéresis del aislador de DFP (Constantinou, 2004)

En la Figura anterior, la primera pendiente representa la fase I y la segunda pendiente representa la fase II.

3.4 Triple péndulo de fricción (FPT)

El aislador de triple péndulo de fricción (FPT, Triple Friction Pendulum) (Figura 3.13) es la última versión de los aisladores de péndulo de fricción que ha desarrollado Earthquake Protection System (EPS). El aislador consta de un deslizador rígido (Rigid Slider) y de cuatro placas con superficies cóncavas (dos placas internas (placa 2 y 3) y dos placas externas (placa 1 y 4)). En total posee 12 propiedades geométricas y 4 propiedades mecánicas. Las propiedades geométricas son los radios de curvatura R_1, R_2, R_3, R_4 ; capacidades de desplazamiento d_1, d_2, d_3, d_4 , y alturas h_1, h_2, h_3, h_4 . Las propiedades mecánicas son los coeficientes de fricción μ_1, μ_2, μ_3 y μ_4 que actúan en las superficies 1, 2, 3 y 4, respectivamente (Fenz & Constantinou, 2008a, 2008c).

El radio efectivo para cada superficie cóncava es:

$$R_{efi} = R_i - h_i \text{ (para } i = 1, 2, 3 \text{ y } 4)$$

Las alturas (h_i , para $i = 1, 2, 3$ y 4) al punto pivote no son constantes para los aisladores de triple péndulo, esto debido a la variación de la ubicación del punto pivote. Sin embargo, se puede asumir que la ubicación del punto pivote permanece fijo y ubicado en el centro del *ensamble articulado* formado por la placa 2, el deslizador rígido y la placa 3 (Fenz & Constantinou, 2008a), o directamente ubicado en la parte central del deslizador rígido.

D_R , D_S y D_C corresponden a los diámetros, del deslizador rígido, de las placas internas y de las placas externas, respectivamente.

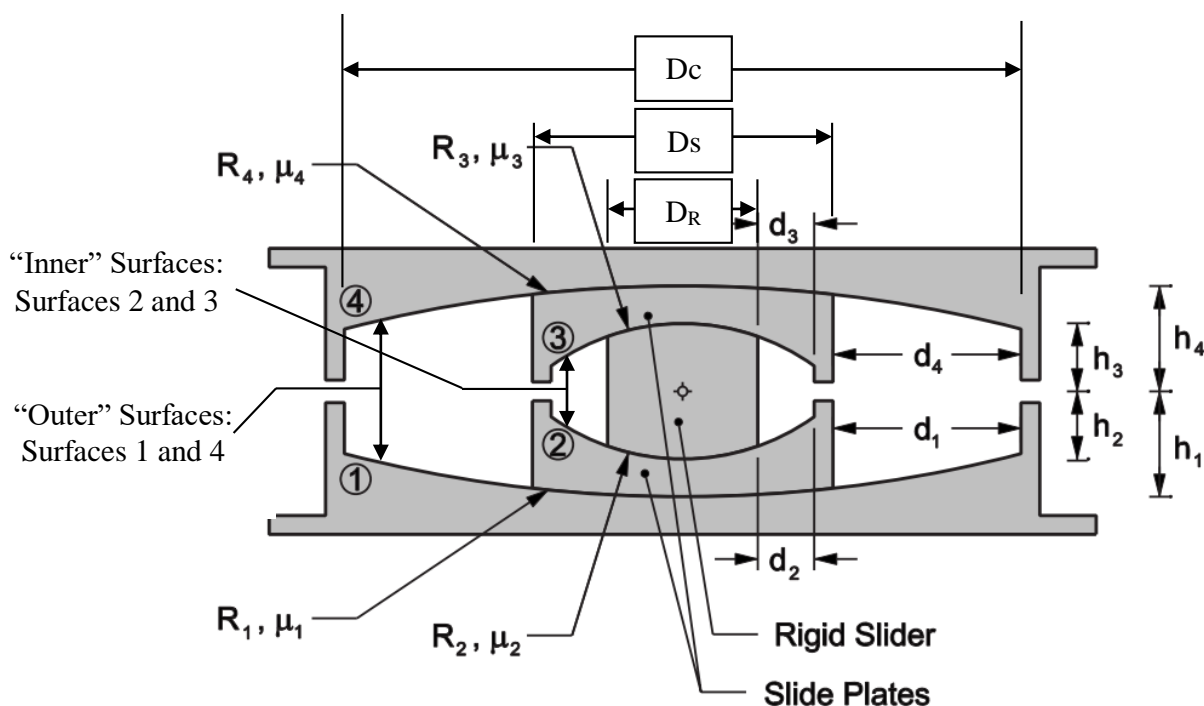


Figura 3.13 Partes principales y nomenclatura del aislador FPT (McVitty & Constantinou, 2015)

Por otra parte, se sabe que el comportamiento del aislador FPT depende del valor que tome cada una de las 16 propiedades descritas anteriormente. Sin embargo, para diseños en ingeniería, se asumen *configuraciones estándar* (al igual que para el aislador DFP), los cuales simplifican la cantidad de propiedades. Estas simplificaciones permiten determinar el comportamiento del aislador FPT, con más facilidad.

Una *configuración estándar*, normalmente usada para aplicaciones en ingeniería, tiene las siguientes características (Fenz & Constantinou, 2008a):

- ✓ Radios de curvatura efectivos de las superficies externas: $R_{ef1} = R_{ef4}$
- ✓ Radios de curvatura efectivos de las superficies internas: $R_{ef2} = R_{ef3}$

En donde:

$$R_{ef2} = R_{ef3} \ll R_{ef1} = R_{ef4}$$

- ✓ Coeficientes de fricción que actúan en las superficies externas: $\mu_1 < \mu_4$
- ✓ Coeficientes de fricción que actúan en las superficies internas: $\mu_2 = \mu_3$

En donde:

$$\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$$

Un aislador que cumpla con las características anteriores, se lo denominará como aislador *FPT estándar*. Además, hay que señalar que, desde este punto, nuestro enfoque se centra solamente en estos aisladores (*FPT estándar*).

Relación Fuerza-Desplazamiento

La demostración de la relación fuerza-desplazamiento del aislador *FPT estándar* fue realizado en 2008 por (Fenz & Constantinou, 2008a) y comprobado experimentalmente en (Fenz & Constantinou, 2008c). En estos estudios se determinó que el movimiento del aislador *FPT estándar* se divide en 5 fases, en donde cada fase es el resultado del deslizamiento en diferentes superficies cóncavas. Por ejemplo, en la primera fase de movimiento, el deslizamiento se da únicamente en las superficies cóncavas 2 y 3, permaneciendo con movimiento nulo en las superficies 1 y 4.

En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de las superficies que se activan en cada fase de movimiento. También, se presenta la ecuación para el cálculo de la rigidez, esto con el objetivo de que se evidencie que la rigidez en cada fase de movimiento es función de las superficies activas (esto es: $K = W/(R_{efi} + R_{efj})$, donde R_{efi} y R_{efj} son los radios efectivos de las superficies activas), afirmación que se demuestra más adelante.

Debe notarse además que la rigidez de la fase I es igual a la rigidez de la fase IV, esto a razón de que $R_{ef2} = R_{ef3}$ y $R_{ef1} = R_{ef4}$, lo mismo ocurre con la rigidez de la fase I y la fase V. En consecuencia, las cinco rigideces de la Tabla 3.1, se reducen a tres.

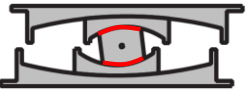




| Gráfico | Fase | Superficies activadas | Rigidez |
|---|------|--|-------------------------------|
|  | I | Deslizamiento en las superficies 2 y 3 | $\frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}}$ |
|  | II | Deslizamiento en las superficies 1 y 3 | $\frac{W}{R_{ef1} + R_{ef3}}$ |
|  | III | Deslizamiento en las superficies 1 y 4 | $\frac{W}{R_{ef1} + R_{ef4}}$ |
|  | IV | Deslizamiento en las superficies 2 y 4 | $\frac{W}{R_{ef2} + R_{ef4}}$ |
|  | V | Deslizamiento en las superficies 2 y 3 | $\frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}}$ |

Tabla 3.1 Fases de movimiento del aislador FPT

La relación fuerza-desplazamiento monótonica de las 5 fases de movimiento se presenta en la Figura 3.14. En esta curva se puede ver que la rigidez se reduce gradualmente con el incremento del desplazamiento, esto es equivalente a decir que el periodo de vibración aumenta. No obstante, también se evidencian incrementos de rigidez en las fases IV y V, incrementos que ayuda reducir los desplazamientos en sismos severos.

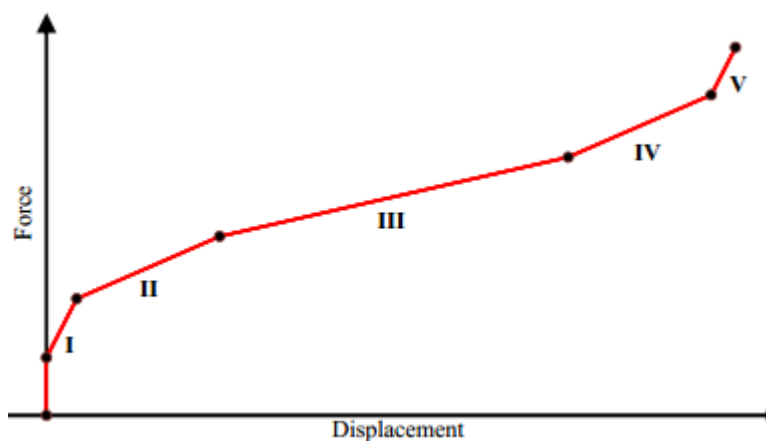


Figura 3.14 Relación fuerza-desplazamiento monótonica del aislador FPT. Adaptado de (Sarlis & Constantinou, 2013)

Para garantizar que se den las cinco fases de movimiento en un aislador *FPT estándar* ($R_{ef2} = R_{ef3} \ll R_{ef1} = R_{ef4}$; $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$), también se debe cumplir con las siguientes condiciones (Fenz & Constantinou, 2008a):

$$\checkmark \quad d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} \text{ equivalente a } F_{f1} < F_{dr2},$$

- ✓ $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{ef3}$ equivalente a $F_{f4} < F_{dr3}$ y
- ✓ $F_{f4} < F_{dr1}$

A continuación se presenta la demostración de la relación fuerza-desplazamiento para un aislador *FPT estándar*, siguiendo el procedimiento descrito en (Fenz & Constantinou, 2008a, 2008b).

3.4.2 Fase de movimiento I

Esta fase inicia cuando la fuerza sísmica, F , supera la fuerza de fricción, $F_{f2} = F_{f3}$. Como la fricción en la superficie 2 es igual al de la superficie 3, entonces el deslizamiento ocurre simultáneamente en ambas superficies.

En la Figura 3.15a se muestra el aislador en la posición deformada de la fase I y en la Figura 3.15b el diagrama de cuerpo libre.

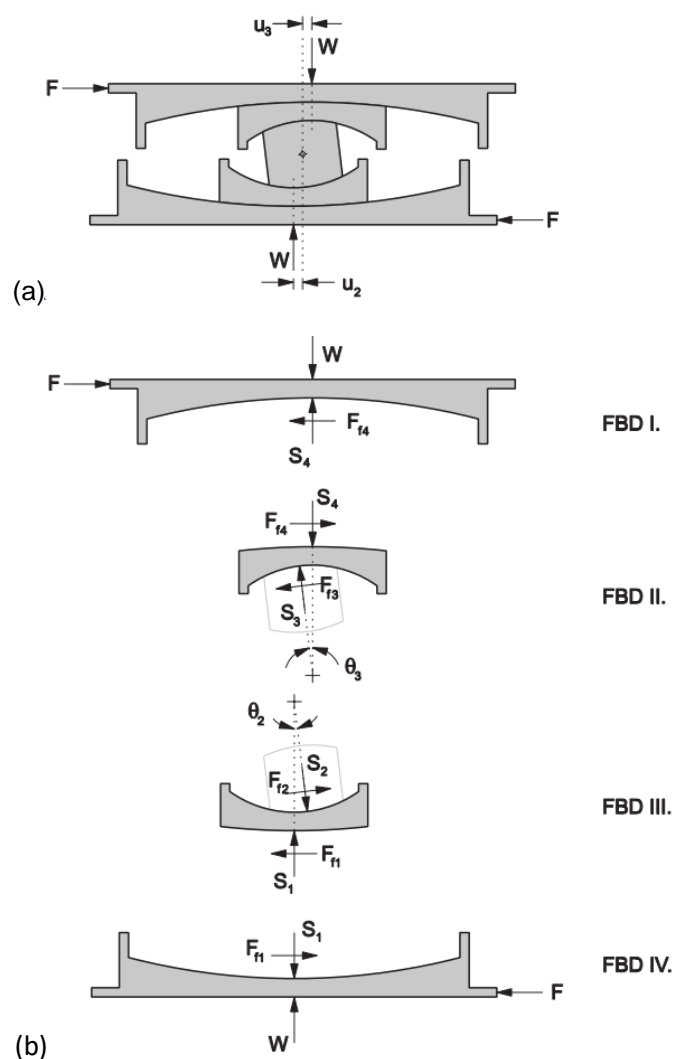


Figura 3.15 Fase I del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre (Fenz & Constantinou, 2008a)

Demostración F-u:

Del diagrama de cuerpo libre III (FBD III) de la Figura 3.15,

$$\sum F_x = 0 \quad \rightarrow \quad F_{f2} \cdot \cos\theta_2 + S_2 \cdot \sin\theta_2 - F_{f1} = 0 \quad (3.15a)$$

$$\sum F_y = 0 \quad \rightarrow \quad S_1 + F_{f2} \cdot \sin\theta_2 - S_2 \cdot \cos\theta_2 = 0 \quad (3.15b)$$

Por geometría,

$$u_2 = R_{ef2} \cdot \sin\theta_2 \quad (3.15c)$$

Del diagrama de cuerpo libre IV (FBD IV),

$$F = F_{f1} \quad (3.16a)$$

$$W = S_1 \quad (3.16b)$$

Combinando las ecuaciones (3.15) y (3.16), para la superficie 2, se tiene, (Ver demostración 1)

$$F = \frac{W}{R_{ef2}} u_2 + F_{f2} \quad (3.17)$$

De un análisis similar al anterior, basado en el FBD I y FBD II, para la superficie 3, se tiene,

$$F = \frac{W}{R_{ef3}} u_3 + F_{f3} \quad (3.18)$$

El deslizamiento ocurre simultáneamente en las superficies 2 y 3, entonces el desplazamiento total viene dado por,

$$u = u_2 + u_3 \quad (3.19)$$

Finalmente, se combinan las ecuaciones (3.17), (3.18) y (3.19) para obtener la ecuación general de la fase I (Ver demostración 2),

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} u + \frac{F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef2} + R_{ef3}} \quad (3.20)$$

La ecuación (3.20) demuestra que la rigidez de la fase I, es inversamente proporcional a la suma de los radios 2 y 3, tal como se mostró en la Tabla 3.1.

En la Figura 3.16 se presenta la curva de histéresis para la fase I, basado en la ecuación 3.20. En el instante de inversión del movimiento la fuerza horizontal, F , se reduce en $2F_{f2} = 2F_{f3}$.

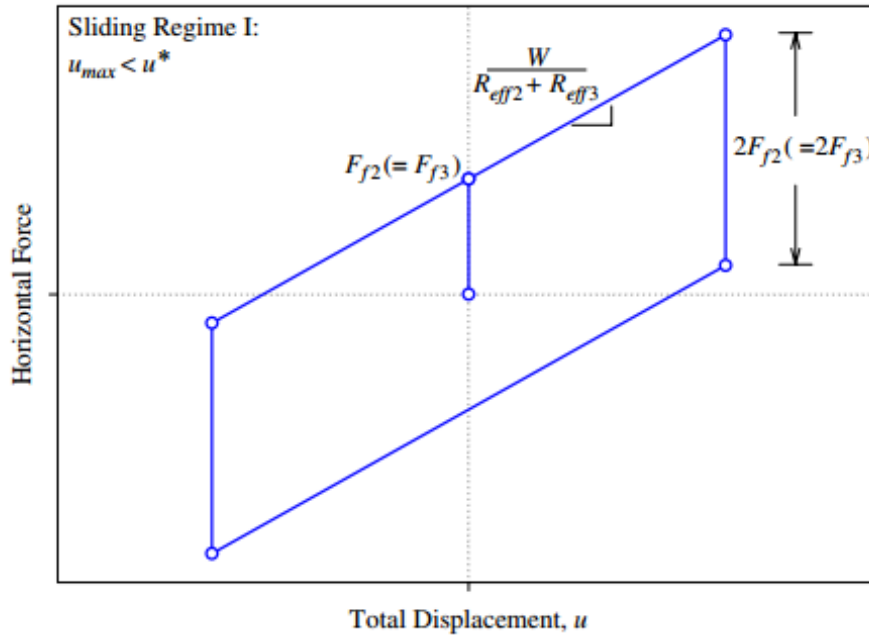


Figura 3.16 Curva de histéresis de la fase I del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008a)

La ecuación (3.20) es válida para valores de desplazamiento, u , menores que el desplazamiento límite, u^* .

Donde, u^* , es el desplazamiento de transición entre la fase I y la fase II, esto ocurre cuando $F = F_{f1}$. Por lo tanto el desplazamiento límite, u^* , se determina reemplazando F por F_{f1} en la ecuación (3.20) (Ver demostración 3),

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3} \quad (3.21)$$

3.4.3 Fase de movimiento II

La fase II inicia una vez superado el límite de desplazamiento, u^* , (cuando $u \geq u^*$ equivalente a decir que $F \geq F_{f1}$). Aquí se da la primera flexibilización o aumento del periodo.

Respecto al deslizamiento, ocurre lo siguiente:

- ✓ Se activa el deslizamiento en la superficie 1.
- ✓ Se detiene el deslizamiento en la superficie 2.
- ✓ Continúa el deslizamiento en la superficie 3.

La Figura 3.17a se muestra el aislador en la posición deformada de la fase II, y en la Figura 3.17b se presenta el diagrama de cuerpo libre.

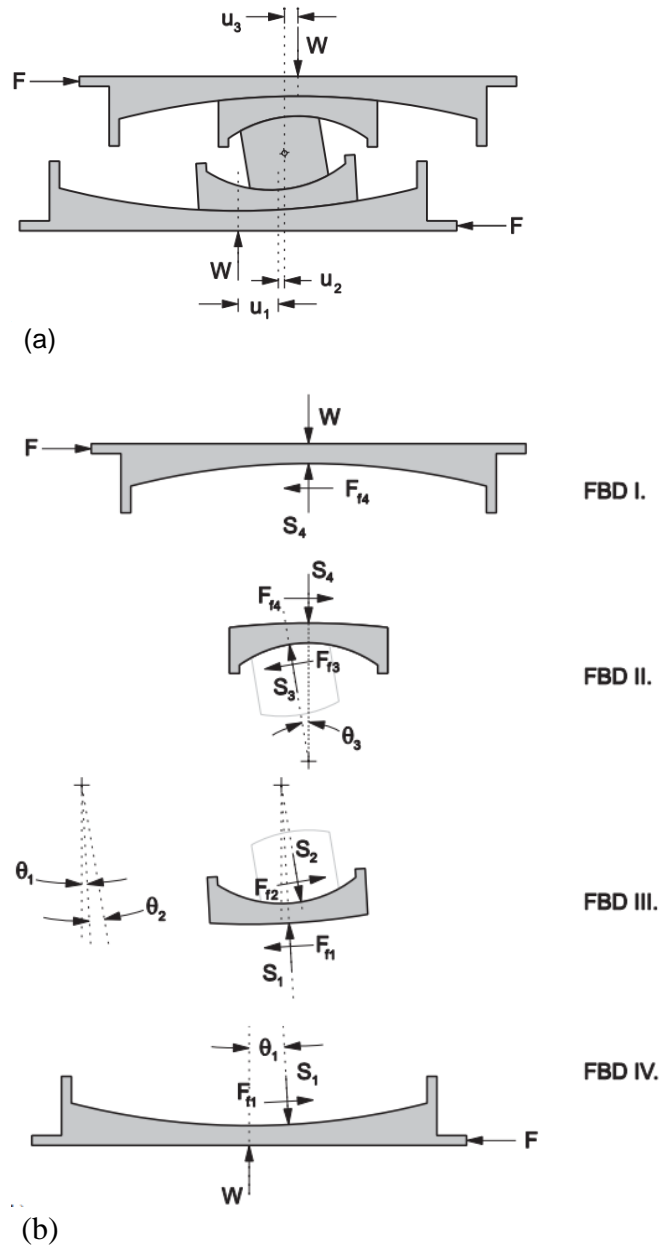


Figura 3.17 Fase II del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre (Fenz & Constantinou, 2008a)

Demostración $F-u$:

Del FBD IV, el ángulo de rotación de la placa 2 respecto a la superficie 1 es θ_1 , mientras que, del FBD III, el ángulo de rotación del deslizador rígido respecto a la superficie 2 es θ_2 . De esta manera, los desplazamientos relativos para las superficies 1 y 2 son:

$$u_1 = R_{ef1} \cdot \text{sen}\theta_1 \quad (3.22a)$$

$$u_2 = R_{ef2} \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (3.22b)$$

Basado en el FBD III, se presenta la Figura 3.18, donde se muestra el equilibrio de fuerzas de la placa 2. En la Figura 3.18 se observa que la inclinación de la fuerza normal producida por el deslizador rígido, S_2 , es igual a la suma de θ_1 y θ_2 , esto a razón de que, el ángulo de rotación del deslizador rígido respecto a la superficie 1 es igual a $\theta_1 + \theta_2$.

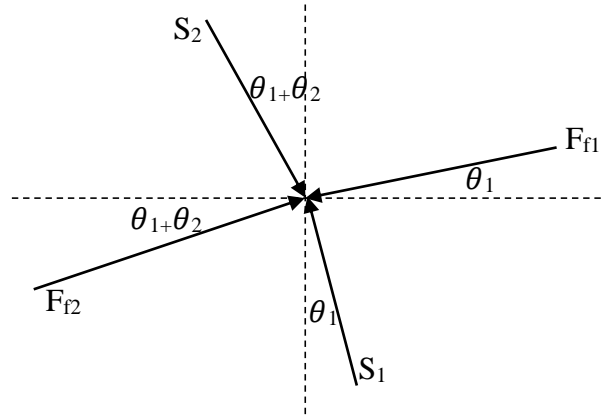


Figura 3.18 Equilibrio de fuerzas en la placa 2

Del equilibrio de fuerzas de la Figura 3.18, se tiene,

$$\sum F_x = 0 \quad S_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) - S_1 \sin\theta_1 - F_{f1} \cos\theta_1 = 0 \quad (3.23a)$$

$$\sum F_y = 0 \quad S_1 \cos\theta_1 + F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) - S_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \sin\theta_1 = 0 \quad (3.23b)$$

Del FBD IV,

$$\sum F_x = 0 \quad S_1 \sin\theta_1 + F_{f1} \cos\theta_1 - F = 0 \quad (3.24a)$$

$$\sum F_y = 0 \quad W + F_{f1} \sin\theta_1 - S_1 \cos\theta_1 = 0 \quad (3.24b)$$

Para la superficie 1, se realiza una demostración similar a la demostración 1, usando el FBD IV de la Figura 3.17b, obteniéndose,

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} u_1 + F_{f1} \quad (3.25)$$

Para la superficie 2, se combinan las ecuaciones (3.22), (3.23), (3.24) y (3.25), y se simplifica considerando que los ángulos θ_1 y θ_2 son relativamente pequeños de tal manera que se puede asumir que: $\cos\theta_1 \approx \cos\theta_2 \approx 1$ y que $\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 = 0$ (Fenz & Constantinou, 2008a) (Ver demostración 4).

$$F = W \left(\frac{u_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \quad (3.26)$$

Igualando (3.25) y (3.26), simplificando y dejando en función de u_2 , se tiene:

$$u_2 = (\mu_1 - \mu_2) R_{ef2} \quad (3.27)$$

La ecuación (3.27) permite concluir que se ha detenido el deslizamiento en la superficie 2, debido a que, $(\mu_1 - \mu_2) R_{ef2}$, representa un valor constante.

El desplazamiento total, viene dado por,

Ahora, si combinamos las ecuaciones (3.18), (3.25), (3.27) pertenecientes a las superficies 3, 1 y 2, con la ecuación (3.28), se obtiene la relación fuerza-desplazamiento total para la fase II (*Ver demostración 5*),

La ecuación (3.29) demuestra que la rigidez de la fase II, es inversamente proporcional a la suma de los radios 1 y 3. La rigidez no depende del radio 2, debido a que no existe deslizamiento en la superficie 2, tal como se demostró con la ecuación (3.27).

La curva de histéresis correspondiente a la fase II, se muestra en la Figura 3.19, basado en la ecuación (3.29). En el instante de inversión del movimiento la fuerza sísmica, F , se reduce en $2F_{f2}$, y seguidamente el movimiento vuelve a las superficies 2 y 3.



La ecuación (3.29) es válida para valores de desplazamiento, u , entre:

$$u^* < u < u^{**}$$

Donde u^{**} es el límite de desplazamiento entre la fase II y la fase III, este valor se determina haciendo $F = F_{f4}$ en la ecuación (3.29), del que se obtiene,

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef3}) \quad (3.30)$$

3.4.4 Fase de movimiento III

La fase III inicia cuando el desplazamiento, u , supera el valor límite, u^{**} (cuando $u \geq u^{**}$ equivalente a decir que $F \geq F_{f4}$).

Respecto al deslizamiento, ocurre lo siguiente:

- ✓ Continúa el deslizamiento en la superficie 1
- ✓ Continúa detenido el deslizamiento en la superficie 2
- ✓ Se detiene el deslizamiento en la en la superficie 3
- ✓ Se activa el deslizamiento en la superficie 4

Demostración F-u:

El ángulo de rotación de la placa 3 respecto a la superficie 4 es θ_4 , y el ángulo de rotación relativo del deslizador rígido respecto a la superficie 3 es θ_3 (análogo a los FBD III y IV de la Figura 3.17). De esta manera, los desplazamientos relativos para las superficies 3 y 4 son:

$$u_3 = R_{ef3} \cdot \text{sen}\theta_3 \quad (3.31a)$$

$$u_4 = R_{ef4} \cdot \text{sen}\theta_4 \quad (3.31b)$$

Para la superficie 1, el movimiento aún es gobernado por la ecuación (3.25).

Para la superficie 2, aún es válida la ecuación (3.26), debido a que permanece sin deslizamiento.

Para la superficie 4, se aplica la demostración 1,

$$F = \frac{W}{R_{ef4}} u_4 + F_{f4} \quad (3.32)$$

Para la superficie 3, se realiza un análisis similar al realizado para determinar la ecuación (3.26) (ver demostración 4),

$$F = W \left(\frac{u_3}{R_{ef3}} + \frac{u_4}{R_{ef4}} \right) + F_{f3} \quad (3.33)$$

Igualando las ecuaciones (3.32) y (3.33), simplificando y dejando en función de u_3 , se tiene,

$$u_3 = (\mu_4 - \mu_3)R_{ef3} \quad (3.34)$$

La ecuación (3.34) demuestra que se ha detenido el deslizamiento en la superficie 3.

El desplazamiento total para la fase III es,

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 \quad (3.35)$$

Combinando las ecuaciones (3.25), (3.26), (3.33) y (3.32), correspondientes a las superficies 1, 2, 3 y 4, respectivamente, con la ecuación (3.35), se obtiene,

$$F = \frac{W}{R_{ef1} + R_{ef4}} u + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3} + F_{f4}(R_{ef4} - R_{ef3})}{R_{ef1} + R_{ef4}} \quad (3.36)$$

Tal como se esperaba, la rigidez es inversamente proporcional a la suma de los radios efectivos de las superficies 1 y 4. Esta rigidez es menor que la rigidez de la fase II, en consecuencia, menor pendiente en la curva de histéresis.

La Figura 3.20 muestra la curva de histéresis de la fase III, basado en la ecuación (3.36). Al momento de inversión del movimiento, la fuerza sísmica, F , se reduce en $2F_{f2}$, luego continúa el deslizamiento en las superficies 2 y 3 y a continuación en las superficies 1 y 3.

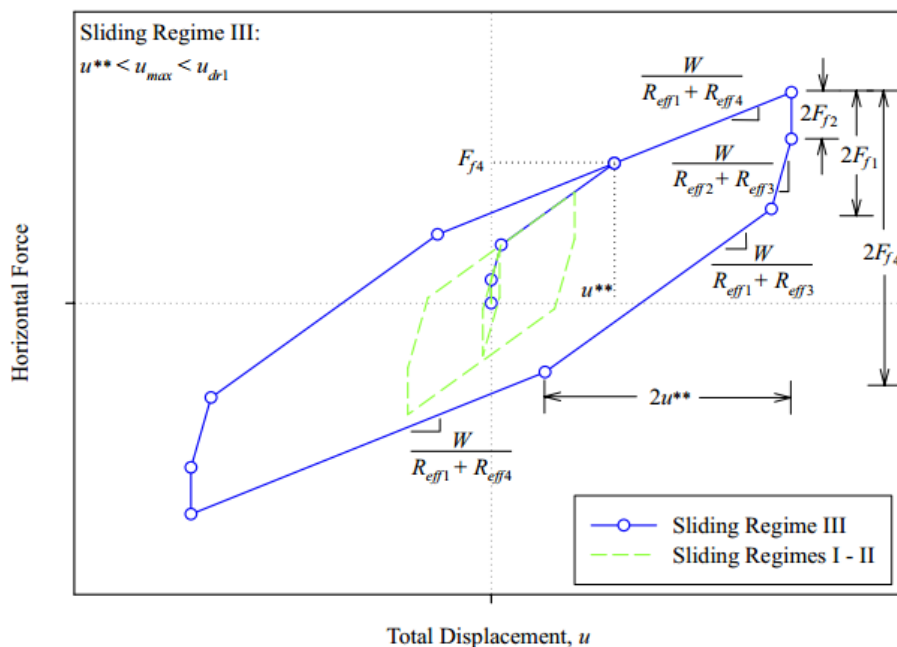


Figura 3.20 Curva de histéresis de la fase III del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008a)

La ecuación (3.36) es válida para valores de desplazamiento, u , tales que:

$$u^{**} < u < u_{dr1}$$

Donde, u_{dr1} , es el límite de desplazamiento entre la fase III y la fase IV, y viene dado por:

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{ef4}}{R_{ef1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef4}) \quad (3.37)$$

u_{dr1} se determina reemplazando $F = F_{dr1}$, en la ecuación (3.36).

F_{dr1} , ocurre cuando la placa 2 choca con el anillo de retención de la placa 1, esto significa que la capacidad de desplazamiento de la superficie 1 ha terminado. Por lo tanto, F_{dr1} se obtiene haciendo $u_1 = d_1$ en la ecuación (3.25), ecuación que gobierna el movimiento en la superficie 1,

$$F_{dr1} = \frac{W}{R_{ef1}} d_1 + F_{f1} \quad (3.38)$$

3.4.5 Fase de movimiento IV

La fase IV inicia cuando el desplazamiento, u , supera el valor límite, u_{dr1} (cuando $u \geq u_{dr1}$ equivalente a decir que $F \geq F_{dr1}$).

Respecto al deslizamiento, ocurre lo siguiente:

- ✓ Se detiene el deslizamiento en la superficie 1 (choque de placa 2 con el anillo placa 1)
- ✓ Se re-activa el deslizamiento en la superficie 2
- ✓ Continúa detenido el deslizamiento en la superficie 3
- ✓ Continúa el deslizamiento en la superficie 4

La Figura 3.21a se muestra el aislador en la posición deformada en la fase IV, y en la Figura 3.21b se presenta el diagrama de cuerpo libre.

Demostración F-u:

Del FBD IV, se determina la ecuación de movimiento para superficie 1,

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} d_1 + F_{f1} + F_{r1} \quad (3.39)$$

La fuerza, F_{r1} , de la ecuación (3.39) se genera por el choque de la placa 2 con el anillo de retención de la placa 1 (ver FBD III y FBD IV)

Para superficie 2, se compara el FBD III de la Figura 3.17b (de la fase II) con el FBD III de la Figura 3.21b (de la fase IV), y se concluye que no ha cambiado. Por lo tanto, la ecuación (3.26) aún gobierna el comportamiento en la superficie 2, pero se debe hacer $u_1 = d_1$ para cumplir con la condición de que la placa 2 choca en el anillo de retención de la placa 1, de esta manera se tiene,

$$F = W \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \quad (3.40)$$

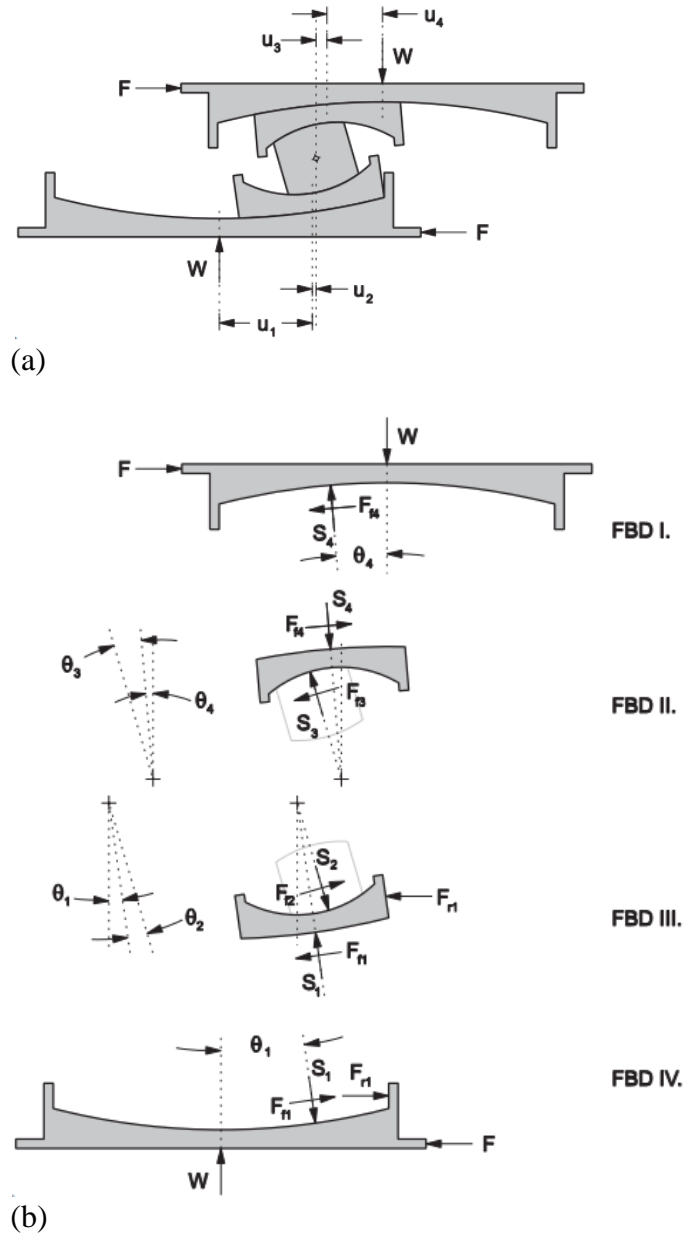


Figura 3.21 Fase IV del aislador FPT a) posición deformada b) diagrama de cuerpo libre (Fenz & Constantinou, 2008a)

En las superficies 3 y 4, no ha cambiado el comportamiento respecto a la fase anterior (fase III), esto quiere decir que las ecuaciones (3.33) y (3.32) se mantienen.

El desplazamiento total para la fase IV es igual a la ecuación (3.35),

Combinando las ecuaciones (3.39), (3.40), (3.33) y (3.32) correspondientes a las superficies 1,2,3 y 4, con la ecuación (3.35), se determina la relación fuerza-desplazamiento total para la fase IV,

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef4}} (u - u_{ar1}) + \frac{W}{R_{ef1}} d_1 + F_{f1} \quad (3.41)$$

La curva de histéresis de la fase IV se presenta en la Figura 3.22.

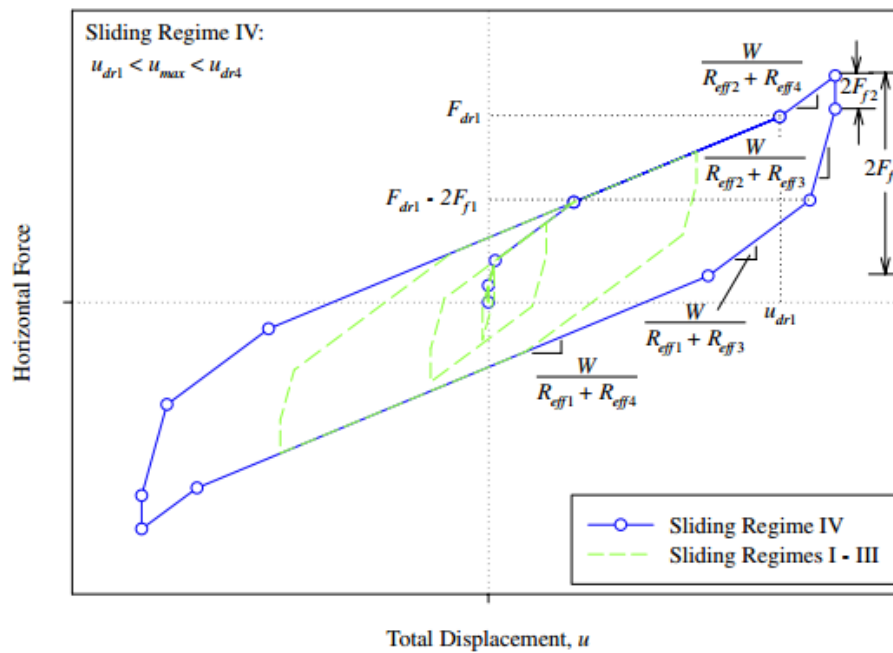


Figura 3.22 Curva de histéresis de la fase IV del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008a)

La ecuación (3.41) es válida para valores de desplazamiento, u , tales que,

$$u_{dr1} < u < u_{dr4}$$

u_{dr4} , es el límite de desplazamiento entre la fase IV y la fase V, esto se da cuando la placa 3 choca con el anillo de retención de la placa 4. La ecuación para calcular u_{dr4} se muestra a continuación:

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{ef1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{ef2} + R_{ef4}) \quad (3.42)$$

3.4.6 Fase de movimiento V

La fase IV inicia cuando el desplazamiento, u , supera el valor límite, u_{dr4} (cuando $u \geq u_{dr4}$ equivalente a decir que $F \geq F_{dr4}$).

Respecto al deslizamiento, ocurre lo siguiente:

- ✓ Se detiene el deslizamiento en la superficie 1
- ✓ Se re-activa el deslizamiento en la superficie 2
- ✓ Se re-activa el deslizamiento en la superficie 3
- ✓ Se detiene el deslizamiento en la superficie 4

En el instante del choque de la placa 3 en el anillo de la placa 4, se genera una fuerza, F_{r4} . Al igual que la ecuación (3.39) de la superficie 1 en la fase IV, para la superficie 4, se tiene:

$$F = \frac{W}{R_{ef4}} d_4 + F_{f4} + F_{r4} \quad (3.43)$$

Para la superficie 3, se remplaza $u_4 = d_4$, en la ecuación (3.33),

$$F = W \left(\frac{d_4}{R_{ef4}} + \frac{u_3}{R_{ef3}} \right) + F_{f3} \quad (3.44)$$

Para las superficies 1 y 2, se mantienen las ecuaciones de la fase IV (ecuaciones (3.39) y (3.40)).

Combinando las ecuaciones (3.39), (3.40), (3.44) y (3.43) de las superficies 1, 2, 3 y 4, respectivamente, con la ecuación (3.35), se tiene como resultado,

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{ef4}} d_4 + F_{f4} \quad (3.45)$$

La curva de histéresis de la fase IV se presenta en la Figura 3.23.

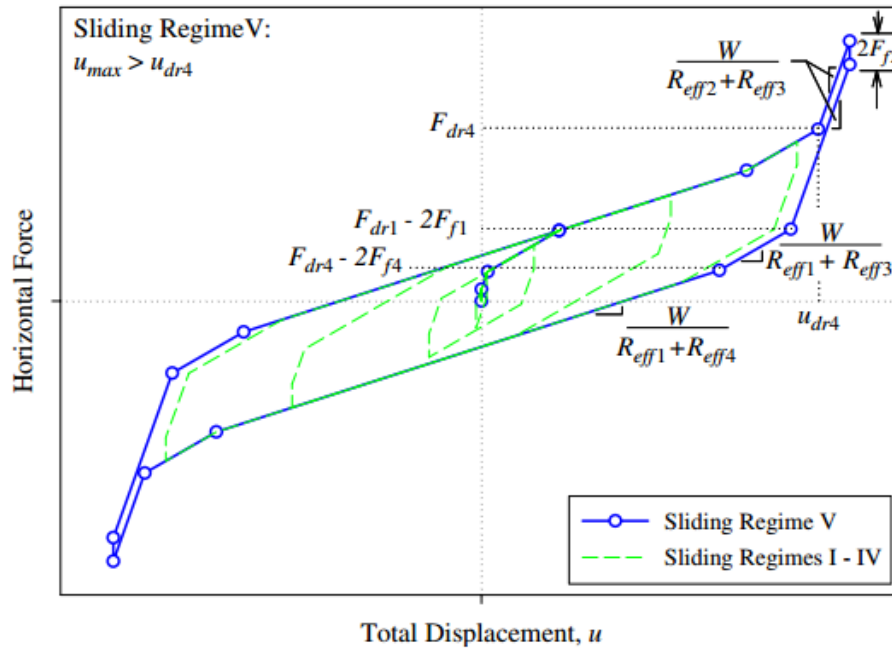


Figura 3.23 Curva de histéresis de la fase V del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008a)

La ecuación (3.45) es válida para valores de desplazamiento, u , tales que,

$$u_{dr4} < u < u_{max}$$

u_{max} , es la capacidad de desplazamiento total del aislador FPT. Para el caso típico en el que $d_1 = d_4$ y $d_2 = d_3$, la capacidad es puede ser calculado como la suma de las capacidad de cada superficie (Sarlis & Constantinou, 2013), esto es:

$$u_{max} = \sum_{i=1}^4 \frac{R_{efi}}{R_i} d_i \quad (3.45)$$

El factor (R_{efi}/R_i) reduce la capacidad de desplazamiento debido a que los deslizadores no solo se trasladan, sino que también rotan.

Capítulo 4: Diseño de aisladores FPT

4.1 Introducción

El diseño de aisladores de triple péndulo de fricción (FPT) implica establecer 12 propiedades geométricas y 4 propiedades mecánicas (ver Figura 3.13). Sin embargo, por economía y seguridad es recomendable usar aisladores configurados de manera estándar que ya hayan sido usados y ensayados previamente (Constantinou et al., 2011). En la Sección 3.4 se definió estos aisladores (FPT estándar) que básicamente consisten en cumplir con $R_{ef1} = R_{ef4} \gg R_{ef2} = R_{ef3}$ y $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$. En estos aisladores también es común que $d_1 = d_4$ y $d_2 = d_3$. En pocas palabras se busca que el aislador FPT diseñado tenga simetría respecto a un plano horizontal que pasa por el centro del deslizador rígido. Con estas consideraciones las propiedades a diseñar se reducen 6 geométricas ($R_1, R_2, h_1, h_2, d_1, d_2$) y 3 mecánicas (μ_1, μ_2, μ_4).

Para llegar al diseño final de aisladores FPT (con las 9 propiedades) en una edificación, se propone seguir el siguiente procedimiento:

- 1. Establecer los objetivos de diseño:** en este punto se estipulan los criterios para el diseño del sistema de aislación.
- 2. Establecer la ubicación de aisladores:** disposición en planta y en elevación de los aisladores.
- 3. Realizar un diseño preliminar:** pre-dimensionamiento de las propiedades del aislador.
- 4. Contactar con el fabricante:** para que el fabricante provea de información de un aislador con similares o mejores características que el determinado en el diseño preliminar.
- 5. Realizar el análisis sísmico de la estructura con el aislador elegido:** con la información del aislador que provee el fabricante, se realiza el análisis sísmico del edificio aislado. Se determinan: desplazamientos, fuerzas axiales y cortantes basales en el sistema de aislación.
- 6. Verificación del aislador elegido:** se verifica que todos los aisladores tengan: capacidad de desplazamiento, resistencia axial y resistencia a cortante, caso contrario, se debe elegir otro aislador que cumpla con estos requerimientos.

Al seguir el procedimiento mencionado, se logra que los aisladores FPT funcionen adecuadamente en la edificación, cumpliendo con los requisitos del ASCE7-16.

Cabe mencionar que el procedimiento propuesto no incluye el diseño de la estructura de la edificación, pero puede ser realizado utilizando los resultados del análisis sísmico que se realiza en el paso 5. Además, únicamente los pasos del 1 al 4 son tratados en este Capítulo. El paso 5, por su extensión, se presentan en el Capítulo 5. Sin embargo, se adelanta al lector que todos los pasos del procedimiento de diseño se aplicarán a un caso de estudio que se realiza en el Capítulo 6.

4.2 Objetivos de diseño

Antes de empezar con el diseño de un sistema de aislación es necesario establecer los objetivos de diseño. Objetivos que permiten seleccionar las propiedades del sistema de aislación para actuar reduciendo uno o varios parámetros de respuesta tales como: desplazamientos (“*moat size*”), aceleraciones de piso, derivas, o cortante basal (SEAOC, 2014). Esto quiere decir que de los objetivos de diseño dependerá el comportamiento del sistema de aislación y de la edificación (se eligen los objetivos para un comportamiento deseado).

En general, los objetivos de diseño se basan en el uso, el desempeño y las características del edificio (SEAOC, 2014). Por ejemplo, si la edificación es de uso esencial (como un Hospital), entonces los objetivos de diseño deben ser tales que permitan controlar el daño en la edificación (en elementos estructurales, componentes no estructurales y en el contenido) de tal manera que se pueda mantener operativo luego de un evento sísmico.

Por otro lado, las provisiones del ASCE7-16 (Capítulo 17) no tienen en cuenta la prevención de daño como objetivo a cumplir en una edificación con aislamiento sísmico. No obstante, se sabe que solo por el hecho de usar un sistema de aislación sísmica es posible que se reduzcan los daños, como consecuencia inherente de la aislación sísmica (McVitty & Constantinou, 2015). Las reducciones de los daños se dan debido a que el ASCE7-16 (Capítulo 17) limita la respuesta inelástica de la superestructura (esto es porque $R_I \leq 2$) y las derivas de entrepiso.

Si el proyecto requiere lograr niveles de desempeño sísmico más avanzados, se puede optar por usar otros métodos de diseño como por ejemplo el propuesto en (Zayas & Mahin, 2010) el cual permite mantener funcional la edificación ante sismos MCE. El método consiste en utilizar parámetros de diseño simplificados que dan como resultado diseños que evitan de forma segura el daño a los miembros estructurales, los componentes no estructurales, y en los contenidos. Los parámetros de diseño que sugieren (Zayas & Mahin, 2010) se presentan en la Tabla 4.1.

| Design Parameters for Structure, Nonstructural Components, and Contents as a Function of the Probability of Earthquake Occurrence and Probability of Being Exceeded | Earthquake with a 2% chance of being exceeded in 50 years (2500 year return period) | Earthquake with a 10% chance of being exceeded in 50 years (500 year return period) | Earthquake expected to occur three times in 50 years (16 year return period) |
|---|--|---|--|
| Structure Design Factors to Reliably Prevent Structure Damage, accounting for the effects of construction imperfections, structure irregularities, asymmetries, and modeling and design limitations and errors. | Elastic Strength Factor of Safety = 1.0, Against Calculated Seismic Force Demand Seismic Design Reduction Factor, $R_w = 1.0$, Max | Elastic Strength Factor of Safety = 1.3, Against Calculated Seismic Force Demand Seismic Design Reduction Factor, $R_w = 0.75$, Max | Elastic Strength Factor of Safety = 2.0, Against Calculated Seismic Force Demand Seismic Design Reduction Factor, $R_w = 0.5$, Max |

Tabla 4.1 Parámetros de diseño para evitar daños y mantener funcional la estructura, los componentes no estructurales, y los contenidos, ante sismos MCE (Zayas & Mahin, 2010)

Continuación...

| | | | |
|---|--|--|--|
| Avoid Damage to Nonstructural Components and Contents, that are damaged by lateral structural displacements. Limit lateral displacements to a percentage of story height, Story Drift % | Story Drift = 1.0%, Maximum | Story Drift = 0.75%, Maximum | Story Drift = 0.5%, Maximum |
| Avoid Damage to Nonstructural Components and Contents that are damaged by structure accelerations, velocities and absolute floor displacements. | FSa0.5 = 0.7g, maximum Limit Floor Spectra Acceleration at 0.5 second period, FSa0.5 | FSa0.5 = 0.6g, maximum Limit Floor Spectra Acceleration at 0.5 second period, FSa0.5 | FSa0.5 = 0.5g, maximum Limit Floor Spectra Acceleration at 0.5 second period, FSa0.5 |

Tabla 4.1 Parámetros de diseño para evitar daños y mantener funcional la estructura, los componentes no estructurales, y los contenidos, ante sismos MCE (Zayas & Mahin, 2010)

En todo caso queda a criterio del ingeniero diseñador establecer cuidadosamente los objetivos de diseño para el proyecto en cuestión.

4.3 Ubicación de aisladores

La selección de la ubicación en planta y en elevación (interfaz de aislación) de los aisladores, es diferente en cada proyecto. Sin embargo, existen algunos criterios generales que pueden ser aplicados en todos los casos, estos se presentan a continuación:

En planta

Lo ideal es tratar de distribuir los aisladores, de tal manera que las cargas axiales que llegan en cada uno de ellos, sean similares, logrando de esta manera que todos los aisladores requieran la misma capacidad axial.

En edificaciones con un sistema de pórticos (sin muros estructurales), por lo general, los aisladores se colocan en cada columna.

En cambio, si la edificación posee muros estructurales, es posible que se necesite uno, dos o más aisladores colocados a lo largo de cada muro, dependiendo de su longitud. No obstante, no es recomendable que una edificación proyectada con aislación sísmica tenga muros en su sistema estructural, ya que los muros provocan la concentración de esfuerzos en ciertos aisladores, dando lugar a que se requiera usar más de un tipo de aislador.

La Figuras 4.1 y 4.2 son ejemplos de distribución de aisladores en planta. La Figura 4.1 muestra como se ha distribuido los aisladores para soportar un tanque de almacenamiento de Gas Natural. La Figura 4.2 muestra la distribución de aisladores en una edificación que posee un sistema de muros y columnas.



Figura 4.1 Distribución de aisladores FPS - Tanque de Gas Natural construido en Grecia (EPS, 2017)

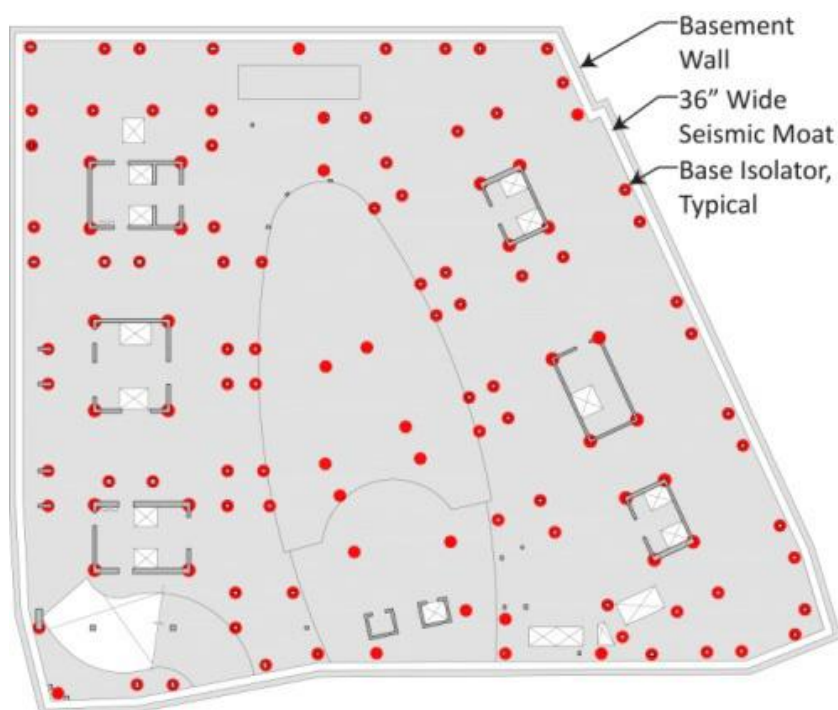


Figura 4.2 Distribución de aisladores FPS en una edificación que tiene muros y columnas (Sarkisian, Lee, Long, Shook, & Díaz, 2013)

Interfaz de aislación

En (Zayas et al., 1990) se presentan tres alternativas para establecer la interfaz de aislación, estas se muestran en la Figura 4.3. En el primer caso, la interfaz de aislación se ubica entre la cimentación y la losa del primer piso; en el segundo caso, la interfaz se ubica debajo de las columnas; y en el tercer caso, la interfaz de aislación se ubica en la parte superior de las columnas.

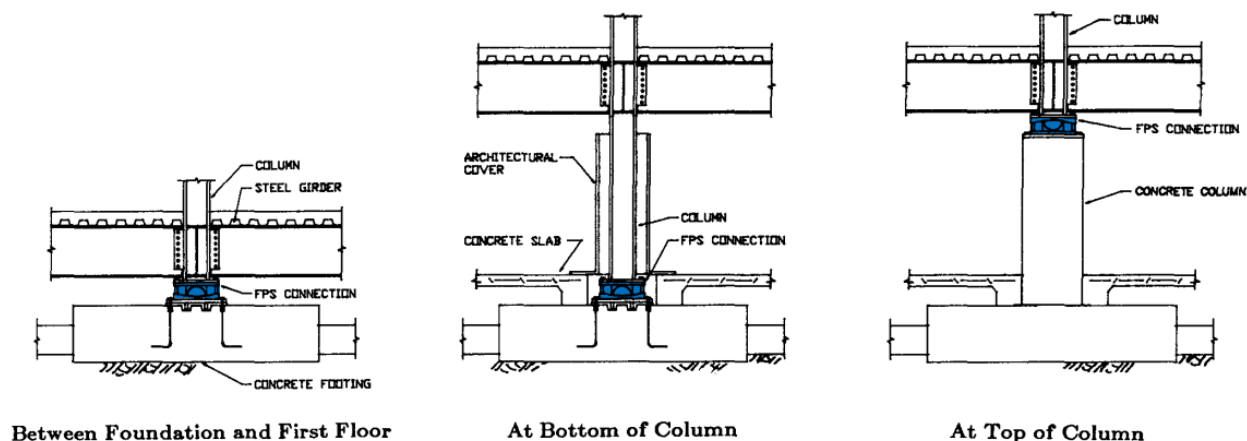


Figura 4.3 Ubicación de la interfaz de aislación en estructuras con aisladores FPS (Zayas et al., 1990)

No obstante, las alternativas mostradas no deben ser tomadas como únicas, ya que existen otras posibilidades que deben ser estudiadas para cada proyecto.

En la Figura 4.4 se muestra un esquema de una estructura, en la cual, la interfaz de aislación se ubica en la parte superior de las columnas (caso 3 de la Figura 4.3), esto directamente condicionado por la topografía del terreno.

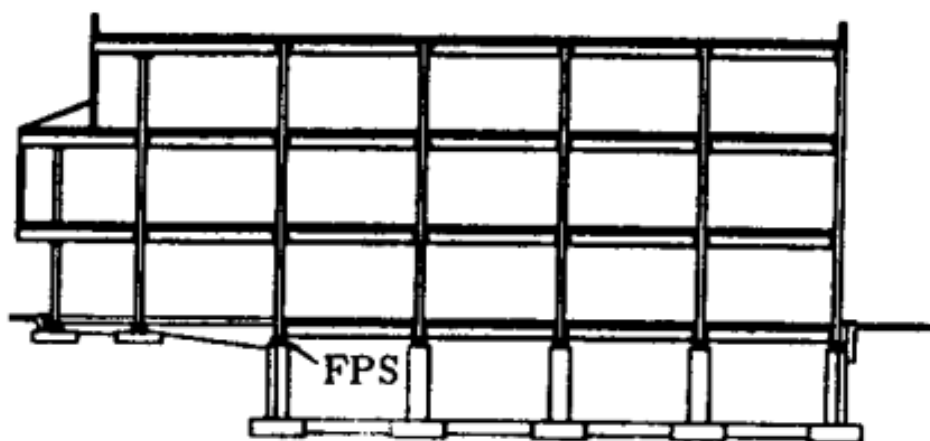


Figura 4.4 Estructura con la interfaz de aislación sobre columnas (Zayas et al., 1990)

En la Figura 4.5 se presentan un ejemplo en donde la interfaz de aislación se ha ubicado entre la cimentación y la losa del primer piso (caso 1 de la Figura 4.3).



Figura 4.5 Interfaz de aislación ubicado entre la cimentación y la losa del primer piso - Hospital construido en EE. UU. (Mills Peninsula Hospital, 2017)

4.4 Diseño preliminar

Como se ha mencionado, el aislador FPT poseen 9 propiedades que pueden ser diseñadas. A su vez, cada propiedad puede tener un amplio rango de variación, implicando tener una gran cantidad de aisladores FPT para elegir. En este caso, lo conveniente, es aplicar un método de diseño que tenga en cuenta todas estas variaciones.

En vista de lo anterior, se propone un método de diseño que requiere realizar preliminarmente múltiples análisis sísmicos no lineales tiempo historia (NLRHA, por sus siglas en inglés) (ver Sección 5.5.2 para mayor información del análisis NLRHA) en una gran cantidad de aisladores FPT con la finalidad de relacionar, por medio de gráficos, las propiedades del aislador (geométricos y friccionales) con los parámetros de respuesta (desplazamientos y cortantes basales). El método se describe en el Manual SEAOC (2014).

Para este fin, se elige un conjunto de aisladores FPT que se van a estudiar, y seguidamente se aplica un análisis sísmico NLRHA en la estructura aislada con aisladores FPT (Figura 4.6a). Por facilidad la estructura aislada se representa usando un modelo simplificado de un grado de libertad (1GDL) (Figura 4.6c). El modelo de 1GDL ignora la flexibilidad de la superestructura y concentra todas las deformaciones en el sistema de aislación (sistema de aislación representado por un aislador FPT), esto es equivalente a imaginar que la superestructura se mueve como un cuerpo rígido (Figura 4.6b). Además, se asume que el peso de la superestructura en el modelo de 1GDL es igual a 1 kip (puede ser otro valor), esto es posible solo para estructuras aisladas con aisladores

FPS, en el cual el periodo es independiente de la masa soportada (ver demostración al final de la Sección 3.2), esto quiere decir que en esta etapa no se requiere conocer el peso de la superestructura.

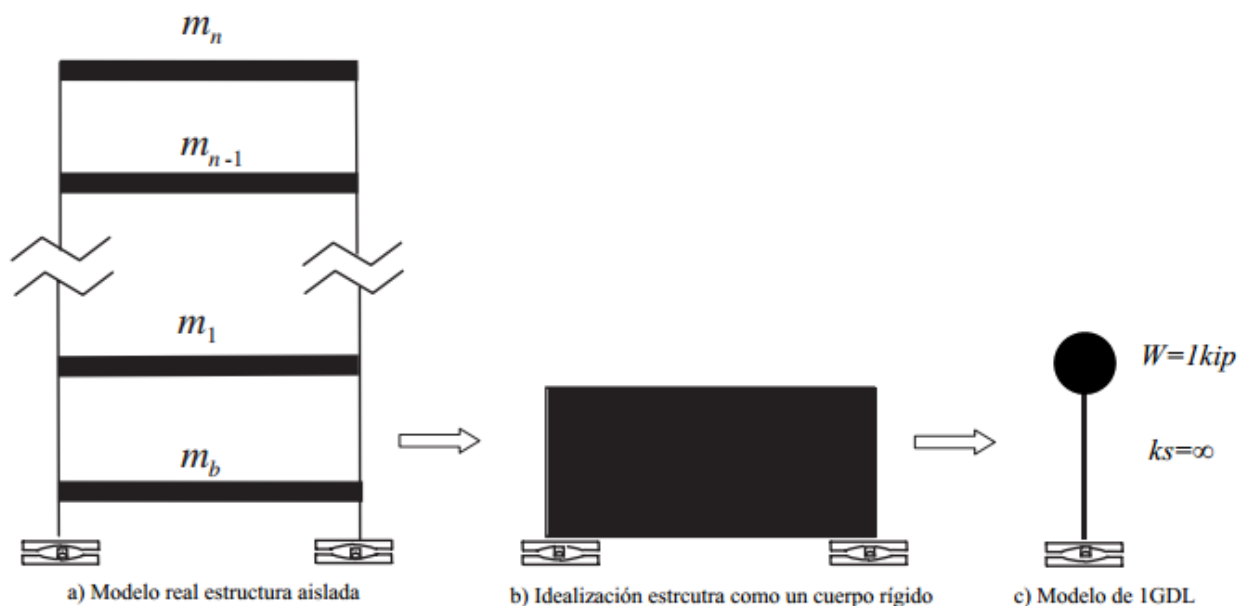


Figura 4.6 Simplificación de la estructura aislada a un modelo de 1GDL. Adaptado de (Tsai, Chiang, & Chen, 2005)

Finalmente, con los resultados de los análisis sísmicos NLRHA se realizan una serie de gráficos que permiten seleccionar con facilidad las propiedades del aislador FPT que mejor se acomoda con los objetivos de diseño.

Seguidamente se presentan los pasos que se deben seguir para aplicar el método de diseño propuesto.

4.4.1 Procedimiento de diseño preliminar

Paso 1: Definir los aisladores que se van analizar

Cada aislador queda definido por las siguientes propiedades:

- ✓ Altura para calcular los radios efectivos externos ($h_1 = h_4$)
- ✓ Altura para calcular los radios efectivos internos ($h_2 = h_3$)
- ✓ Radios de curvatura de las superficies externas ($R_1 = R_4$)
- ✓ Radios de curvatura de las superficies internas ($R_2 = R_3$)
- ✓ Coeficientes de fricción de las superficies externas ($\mu_1 \leq \mu_4$)
- ✓ Coeficientes de fricción de las superficies internas ($\mu_2 = \mu_3$)

A continuación se detalla cómo establecer los valores de estas propiedades. Para esto, se recomienda tener presente la terminología de la Figura 3.13.

Alturas (h_i):

Las alturas sirven para calcular los radios efectivos de las superficies cóncavas ($R_{efi} = R_i - h_i$). (Constantinou et al., 2011) da las siguientes recomendaciones para determinar estos valores:

- ✓ Para garantizar la estabilidad del aislador, la relación de aspecto del deslizador rígido debe ser menor que 1.0, esto es:

$$\frac{h_2 + h_3}{D_R} \leq 1.0$$

Siendo D_R el diámetro del deslizador rígido.

El diámetro de deslizador rígido (D_R), se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$A_R \geq \frac{P}{\sigma_{max}}$$
$$D_R \geq \sqrt{\frac{4A_R}{\pi}}$$

donde:

P : Fuerza axial máxima incluyendo efectos sísmicos (Richins, 2011)

σ_{max} : Esfuerzo máximo = 60 ksi (Richins, 2011)

- ✓ El espesor de las placas 2 y 3 (en el centro), debe ser al menos 1 pulgada, esto quiere decir que:

$$h_1 + h_4 \geq h_2 + h_3 + 2 \text{ in}$$

Radios de curvatura(R_i)

$R_1 = R_4$: Estos radios deben ser iguales a los mostrados en la Tabla 4.3 (radios estándar). En la Tabla 4.3 también se listan los correspondientes diámetros de las superficies cóncavas externas (D_c) que se fabrican con frecuencia. D_c se define en la Figura 3.13. Los diámetros D_c representan la capacidad de desplazamiento del aislador y es analizado en el paso 4.

$R_2 = R_3$: No se ha encontrado información referente a que radios que se fabrican con frecuencia por lo que se recomienda usar directamente los radios efectivos que se presentan en el Manual (SEAO, 2014), estos son: 5.5, 12, 23 y 33 pulgadas. Estos radios ya abren un amplio rango de posibilidades de diseño.

Además, siempre se debe cumplir que: $R_1 = R_4 \gg R_2 = R_3$.

Respecto a los diámetros de las superficies cóncavas internas (D_s), se dice que se fabrican en el rango de 6 a 65 pulgadas. D_s se define en la Figura 3.13.

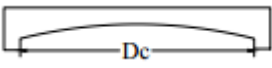
| Id. | Radio de curvatura ($R_1 = R_4$) (in) | Diámetro de las superficies cóncavas (D_c) (in) |
|-----|--|--|
| | |  |
| 1 | 61 | 14 |
| 2 | | 18 |
| 3 | | 22 |
| 4 | | 31 |
| 5 | 88 | 36 |
| 6 | | 27 |
| 7 | | 31 |
| 8 | | 33 |
| 9 | | 36 |
| 10 | | 39 |
| 11 | | 41 |
| 12 | | 44 |
| 13 | | 46 |
| 14 | | 51 |
| 15 | | 56 |
| 16 | 120 | 27 |
| 17 | | 56 |
| 18 | 156 | 63 |
| 19 | | 70 |
| 20 | | 106 |
| 21 | | 124 |
| 22 | 238 | 78 |
| 23 | | 94 |
| 24 | | 106 |
| 25 | | 131 |
| 26 | | 143 |

Tabla 4.2 Dimensiones estándar para placas cóncavas en aisladores FPS (Constantinou et al., 2011)

Coeficientes de fricción(μ_i)

Los coeficientes de fricción que se pueden desarrollar están en el rango de 0.02 a 0.12 pero los diseños están en el rango de 0.05 a 0.07 (De La Llera et al., 1998), esto para los aisladores de simple péndulo (SFP). Para los aisladores de triple péndulo (FPT), al tener tres coeficientes de fricción ($\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 \leq \mu_4$), es posible que se tengan otros rangos para los diseños.

Por ejemplo, en cinco proyectos con aislamiento sísmico (con aisladores FPS) desarrollados por la firma SOM, tres proyectos con aisladores SFP usan coeficientes de fricción en el rango de 5% a 7%, mientras que dos proyectos con aisladores FPT usan coeficientes de fricción de 8% y 9% (Sarkisian et al., 2013). Por lo tanto, es verificable que los aisladores FPT abren un rango de coeficientes de fricción más amplio para los diseños.

A continuación se dan los rangos de variación para las superficies externas e internas, los cuales representan un resumen de los diferentes documentos técnicos que se han revisado. Pero estos

deben ser tomados únicamente como referenciales y que deben ser cambiados en caso que los fabricantes construyan aisladores con otros rangos de variación.

- ✓ Para las superficies cóncavas externas $\mu_1 < \mu_4$: se puede usar rangos desde 3% a 10%

Estos coeficientes de fricción son los que más influyen en el comportamiento global de la estructura (hablando en términos de desplazamientos y cortantes basales) ya que, estos son los encargados de disipar la energía ante sismos de diseño (SEAOC, 2014).

- ✓ Para las superficies cóncavas internas $\mu_2 = \mu_3$: se pueden usar rangos desde 1% a 2%

Estos coeficientes de fricción, al ser relativamente pequeños, no tienen gran influencia en el comportamiento global de la estructura, aunque se vuelven muy importantes hablando en términos de aceleraciones de piso.

Además, al ser un diseño preliminar, fácilmente se pueden establecer otros rangos de variación, que luego serán descartados dependiendo de la respuesta sísmica de la estructura.

Paso 2: Análisis sísmico NLRHA

Para realizar los análisis se puede usar cualquier software que permita realizar análisis tiempo historia, pero debe ser capaz de incluir el comportamiento no lineal del aislador. Softwares como Bispec, Nonlin y OpenSees permiten esto. Sin embargo, se recomienda usar OpenSees debido a que este software tiene incorporado un elemento link triple péndulo de fricción, elemento link capaz de representar de manera precisa el comportamiento histerético multi-fases del aislador FPT (Dao, Ryan, Sato, & Sasaki, 2013).

Luego de realizado los análisis usando cualquier software con los requisitos descritos, se realiza el procesamiento de información para encontrar los parámetros de respuesta, específicamente el desplazamiento y cortante basal de cada aislador analizado. Esto se realiza de la siguiente manera:

- ✓ Desplazamiento máximo D_M :

El desplazamiento máximo, D_M , se determina como el promedio de los máximos desplazamiento SRRS de los n sismos analizados.

$$D_M = \sum_{i=1}^n D_{SRSS_max(i)} / n \quad (4.1)$$

Para cada sismo, el desplazamiento máximo, $D_{SRSS_max(i)}$, se determina como el valor máximo de la suma vectorial de las componentes ortogonales en cada paso de tiempo.

$$D_{SRSS_max(i)} = \max \left(\sqrt{Dx_{(t)}^2 + Dy_{(t)}^2} \right) \quad (4.2)$$

para $i=1,2,\dots,n$

En donde:

n : número de sismos analizados

$D_{SRSS_max(i)}$: es el desplazamiento SRSS, máximo del sismo i

$Dx_{(t)}$: Desplazamiento en la dirección x , en el instante t

$Dy_{(t)}$: Desplazamiento en la dirección y , en el instante t

✓ Cálculo de V_M

El cortante basal V_M se determina usando la ecuación 3.36 o la ecuación 3.41 haciendo $F = V_M$ y $u = D_M$ (D_M calculado con la ecuación 4.1). Específicamente, la ecuación 3.36 se usa si D_M se encuentra en la fase de movimiento III, y la ecuación 3.41 si D_M se encuentra en la fase IV. No se considera el uso de la ecuación 3.45 correspondiente a la fase V debido a que los aisladores FPT normalmente se diseñan para operar en las fases I a IV. La fase V se utiliza únicamente como reserva y para frenar desplazamientos ante sismos severos (Constantinou et al., 2011).

Finalmente, se grafican los parámetros de respuesta de la estructura aislada vs las propiedades de los aisladores. Esto es: desplazamiento vs fricción, cortante basal vs fricción. además, se grafica el cortante basal vs desplazamiento.

Recomendación: si la cantidad de FPTs analizados es grande, procesar los datos puede volverse una tarea ineficiente, por eso se sugiere realizar rutinas en Matlab.

Paso 3: Selección del aislador

Usando los resultados del paso anterior, se procede a elegir el aislador que cumpla con los objetivos de diseño. En este punto es necesario comprobar que el aislador elegido tiene la suficiente capacidad de restitución.

Acerca de la capacidad de restitución

Un criterio que se debe tener en cuenta, para la selección de propiedades, tiene que ver con la capacidad de restitución (ver Sección 5.3), esto debido a que la capacidad de restitución es controlada por el radio de curvatura y el coeficiente de fricción. Esto se demuestra a continuación:

Por definición la fuerza de restitución para un aislador de simple péndulo (SFP) es:

$$F_{res} = 0.5 K_b \cdot D_M$$

Donde: F_{res} : Fuerza de restitución

K_b : Rigidez post-fluencia, es igual a W/R_{ef} (ver ecuación 3.5)

D_M : Desplazamiento máximo

Haciendo $K_b = W/R_{ef}$ en la ecuación anterior, se tiene:

$$F_{res} = 0.5 \frac{W}{R_{ef}} D_M$$

Esta última ecuación demuestra que la fuerza de restitución depende del radio de curvatura. Esto es, a mayor radio de curvatura se tiene menor fuerza de restitución.

Por otro lado, la dependencia entre el coeficiente de fricción y la fuerza de restitución está implícita en el desplazamiento D_M , esto sabiendo que un incremento del coeficiente de fricción, incrementa el amortiguamiento y en consecuencia se reduce el desplazamiento. Esto significa que, a mayor coeficiente de fricción, menor capacidad de restitución.

Para entender mejor este tema se presentan las curvas de histéresis de la Figura 4.7, en los que se ha variado el periodo (T) y el coeficiente de fricción (μ). La variación del periodo se sobreentenderá como la variación del radio de curvatura ya que se demostró que $T = 2\pi\sqrt{R_{ef}/g}$ y por lo tanto si crece el radio también crece el periodo. Cabe mencionar que las curvas de histéresis de la Figura 4.7 pertenecen a de un aislador de simple péndulo, pero en definición es lo mismo para un aislador de triple péndulo.

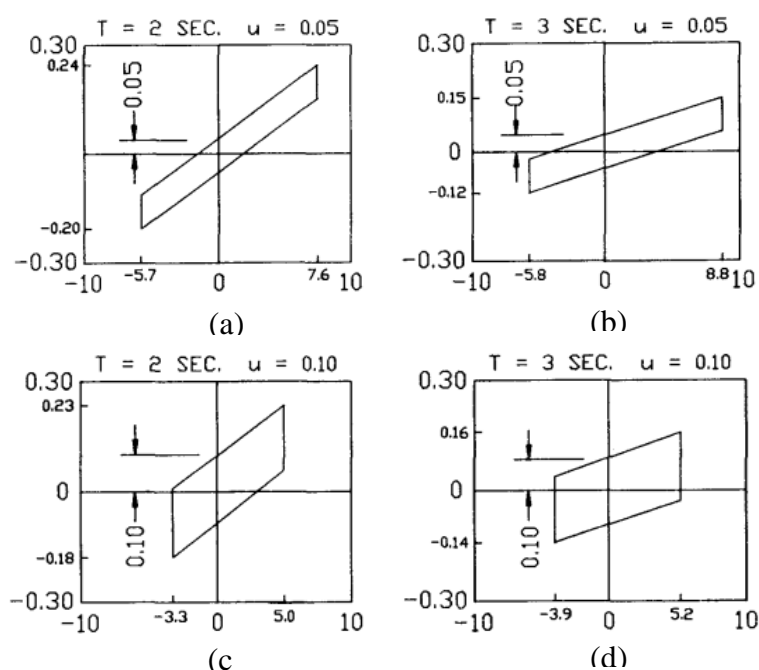


Figura 4.7 Implicación del periodo y coeficiente de fricción en el comportamiento de aisladores FPS (Zayas et al., 1990)

De la Figura anterior:

- Entre la Figura 4.7a y la Figura 4.7b se incrementa el periodo de 2 seg a 3 seg, manteniendo el coeficiente de fricción constante e igual a 0.05. Aplicando la ecuación anterior se tiene que $F_{res(T=2seg)} = 0.097$ y $F_{res(T=3seg)} = 0.050$, con lo que se comprueba que efectivamente al incrementar el periodo (radio de curvatura) se reduce la capacidad de restitución.

- Ahora si comparamos la Figura 4.7b y la Figura 4.7d vemos que se mantiene un periodo de 3.0 seg, pero se incrementa el coeficiente de fricción de 0.05 a 0.10. con lo cual se reduce el desplazamiento de 8.8 a 5.2 pulgadas. Calculando la fuerza de restitución, se tiene $F_{res(DM=8.8)} = 0.050$ y $F_{res(DM=5.2)} = 0.030$, con lo que se comprueba que al incrementar el coeficiente de fricción, también se reduce la fuerza de restitución.

De lo anterior se tiene que la curva de histéresis de la Figura 4.7d tiene la menor fuerza de restitución, esto como consecuencia de que se ha incrementado simultáneamente el periodo y el coeficiente de fricción. Por lo tanto, se concluye que no es recomendable combinar radios de curvatura y coeficientes de fricción grandes. Pero, en términos cualitativos, si se podría combinar:

- ✓ Radios de curvatura grandes con coeficientes de fricción pequeños.
- ✓ Radios de curvatura pequeños con coeficientes de fricción grandes.

Paso 4: Capacidad de desplazamiento

En el paso anterior (paso 3) se ha elegido un aislador FPT que posee: alturas $h_2 = h_3 < h_1 = h_4$; radios de curvatura $R_2 = R_3 < R_1 = R_4$ y coeficientes de fricción $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 \leq \mu_4$ que responde con un desplazamiento D_M y cortante basal V_M . Con esta información se procede a determinar las capacidades de desplazamiento $d_2 = d_3 < d_1 = d_4$ que requiere el aislador para acomodar el desplazamiento D_M .

Capacidad de desplazamiento placas internas ($d_2 = d_3$)

La capacidad de desplazamiento mínimo que deben tener las placas internas del aislador FPT debe ser:

$$d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2}$$

$$d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{ef3}$$

Estas desigualdades son requeridas para lograr las 5 fases de movimiento en el aislador de triple péndulo que se describió en la Sección 3.4.

Capacidad de desplazamiento placas externas ($d_1 = d_4$)

La norma ASCE7-16, requiere que un aislador se diseñe para tener una capacidad de desplazamiento de al menos D_{TM} (desplazamiento total máximo). Por lo tanto $d_1 = d_4$ se calcula para tener una capacidad de desplazamiento D_{TM} . En la Sección 5.5.1 se explica la manera de determinar D_{TM} .

Con se explicó anteriormente un aislador FPT se diseña para funcionar en la fase III o IV. Si se quiere que el aislador funcione en la fase III, entonces se debe garantizar que D_{TM} no sobrepase el límite de desplazamiento u_{dr1} (ver ecuación 3.37 en la Sección 3.4); de la misma forma si se quiere que el aislador funcione en la fase IV, entonces D_{TM} no debe sobrepasar u_{dr4} (ver ecuación 3.42 en la Sección 3.4). Esto se traduce en:

- ✓ Fase III, si $D_{TM} \leq u_{dr1}$
- ✓ Fase IV, si $D_{TM} \leq u_{dr4}$

A continuación se presenta como calcular $d_1 = d_4$ considerando que se diseña para operar en la fase III, siendo similar si se quiere que el aislador opere en la fase IV. También, se presenta una ecuación simplificada.

Método 1 (Diseño para operar en la fase III)

Se debe cumplir con:

$$D_{TM} \leq u_{dr1}$$

u_{dr1} se calcula con la ecuación 3.37

Despejando d_1 de la desigualdad anterior, se tiene:

$$d_1 \geq \left[\frac{D_{TM} - 2(\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} - R_{ef2})}{2} \right] \frac{R_1}{R_{ef1}}$$

Método 2 (Ecuación simplificada)

Si se asume que únicamente las placas 1 y 4 proveen la capacidad de desplazamiento D_{TM} , entonces se tiene:

$$d_1 \geq \left(\frac{D_{TM}}{2} \right) \frac{R_1}{R_{ef1}}$$

Con esta ecuación, si $\mu_4 \approx \mu_1$ entonces el aislador opera en la fase III, caso contrario puede operar en la fase III o IV.

En los dos métodos se puede ver que el término de la derecha se encuentra multiplicado por un factor R_1/R_{ef1} , esto se realiza para considerar la reducción de la capacidad de desplazamiento por la rotación de las placas.

Dimensión en planta

Adicionalmente se calcula D_S y D_C con la finalidad de tener una idea del tamaño que va tener el aislador. Para esto se presenta la Figura 4.8 donde además se muestra la nomenclatura para el espesor de los anillos de retención.

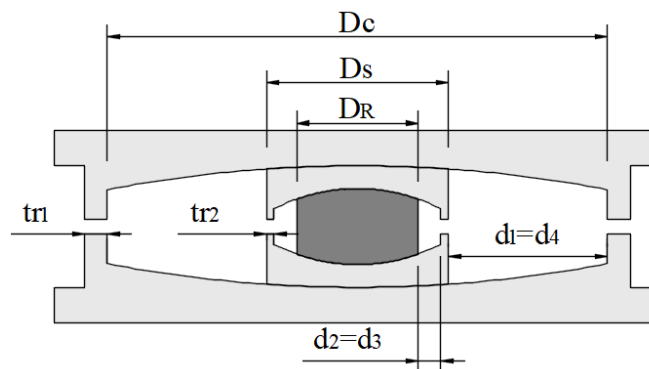


Figura 4.8 Nomenclatura del aislador FPT para calcular el tamaño del aislador

Diámetro placas internas (D_S)

De la Figura 4.8, se tiene:

$$D_S = D_R + 2t_{r2} + d_2 + d_3$$

t_{r2} : es el espesor del anillo de retención de la placa 2 (igual al de la placa 3).

Diámetro superficies de las placas externas (D_C)

$$D_C = D_S + d_1 + d_4$$

4.5 Contacto con el fabricante

Luego de realizar el diseño preliminar, es necesario contactar con el fabricante de aisladores FPT con la finalidad de verificar la disponibilidad de un aislador con las características del diseño preliminar, especialmente de radios de curvatura (equivalente al periodo) y coeficientes de fricción (equivalente al amortiguamiento). En el caso que no disponer de un aislador con iguales características, es probable que el fabricante proporcione información de un aislador con similares características o recomendará usar un aislador con mejores características al diseñado. Este procedimiento debe ser realizado obligatoriamente, porque luego de este punto, se debe realizar el análisis sísmico de la estructura 3D.

Acerca del fabricante

Earthquake Protection System (EPS) es la única empresa que fabrica los aisladores de triple péndulo de fricción, esto debido a que EPS tiene patentado este producto.

La nomenclatura que usa EPS para identificar sus aisladores es la siguiente:

$$\textbf{FPT } R_o D_c / D_s - R_i / D_R - h_R$$

donde:

R_o : Radio de curvatura de las superficies externas ($R_1 = R_4$)

D_c : Diámetro de las superficies cóncavas externas (ver Figura 4.6)

D_s : Diámetro del aislador interno (ver Figura 4.6)

R_i : Radio de curvatura de las superficies internas ($R_2 = R_3$)

D_R : Diámetro del deslizador rígido (ver Figura 4.6)

h_R : Altura del deslizador rígido ($2h_2 = 2h_3$)

Adaptado de: (Constantinou, Aguiar, Morales, & Caiza, 2016)

Por ejemplo, el aislador FPT 15663/22-20/16-8 que se presenta seguidamente en la Figura 4.9, tiene la siguiente geometría:

$$R_o = 156"$$

$$D_c = 63"$$

$$D_s = 22"$$

$$R_i = 20"$$

$$D_R = 16"$$

$$h_R = 8"$$

Esto corresponde a:

$$R_1 = R_4 = 156"$$

$$R_2 = R_3 = 20"$$

$$h_1 = h_4 = \frac{12"}{2} = 6" \quad (\text{ver Figura 4.9})$$

$$h_2 = h_3 = \frac{h_R}{2} = 4"$$

$$d_1 = d_4 = \frac{D_c - D_s}{2} = 20.5"$$

$$d_2 = d_3 = \frac{D_s - D_R - 2t_{r2}}{2} = 2.5" \quad (\text{asumiendo } t_{r2}=0.5")$$

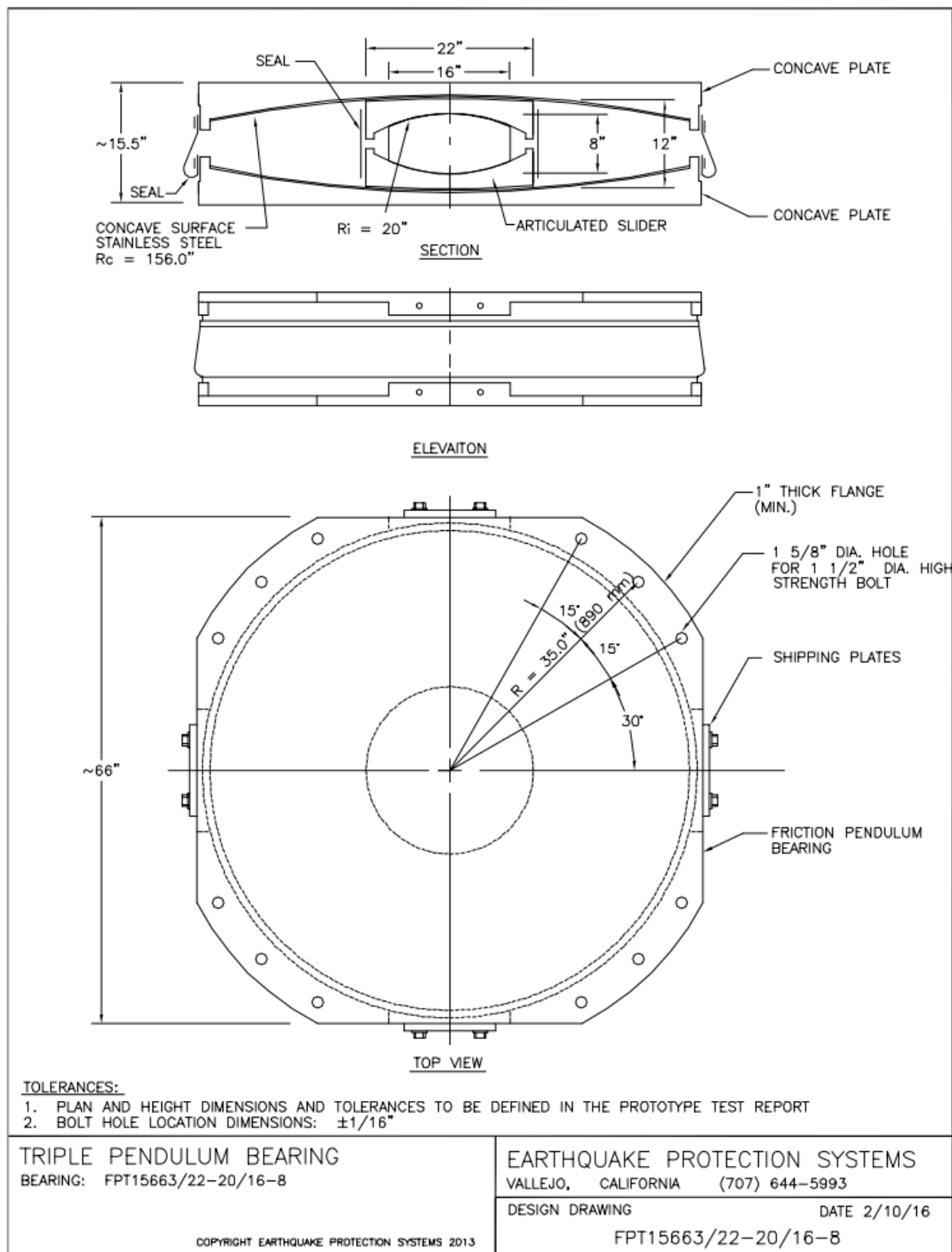


Figura 4.9 Ejemplo de la nomenclatura de EPS – FPT 15663/22-20/16-8 (Zayas et al., 2016)

Capítulo 5: Análisis sísmico

5.1 Introducción

El análisis sísmico se realiza de acuerdo al ASCE7-16, Capítulo 17 “Requisitos de Diseño Sísmico para Estructuras Sísmicamente Aisladas”, el cual provee de una nueva metodología para analizar y diseñar estructuras con sistemas de aislación sísmica. La nueva metodología consiste en utilizar únicamente el Sismo Máximo Considerado (MCE), que tiene una probabilidad de 2% de ser excedido en 50 años, para el análisis y diseño.

El Capítulo 17 del ASCE7-16 provee de tres métodos para realizar el análisis sísmico de estructuras sísmicamente aisladas, un método estático (fuerza lateral equivalente) y dos métodos dinámicos (respuesta espectral y tiempo historia).

Además, el Capítulo 17 del ASCE 7-16 requiere que se realicen dos análisis paralelos, uno usando las propiedades del límite superior (Upper Bound) del sistema de aislación y otro usando las propiedades de límite inferior (Lower Bound). De los dos análisis, los parámetros de respuesta más críticos se deben usar para el diseño.

5.2 Terminología

Se presenta la terminología y las definiciones más importantes del “sistema de aislación” y de los “desplazamientos”, que se usa en la norma ASCE7-16.

1. Para el sistema de aislación (Ver Figura 5.1.)

Definiciones:

Nivel de base (Base level): Primer nivel de la estructura aislada sobre la interfaz de aislación.

Interfaz de aislación (Isolation interface): Es el límite entre la parte superior de la estructura, que se encuentra aislado, y la porción inferior de la estructura (sub estructura), que se mueve rígidamente con el suelo.

Sistema de aislación (Isolation system): Es la colección de elementos estructurales que incluye todas las unidades de aislador de manera individual, todos los elementos estructurales que transfieren la fuerza entre los elementos del sistema de aislación, y todas las conexiones con otros elementos estructurales. Los sistemas de aislación también incluyen el sistema de restricción a viento, los dispositivos de disipación de energía, y/o al sistema de restricción de desplazamiento.

Unidad de aislador (Isolator unit): Es un elemento que es horizontalmente flexible y verticalmente rígido y conforma el sistema de aislación el cual permite grandes deformaciones laterales, por ende, menores cargas sísmicas en el diseño. Un aislador se permite usar como parte de o en conjunto para soportar el peso de la estructura.

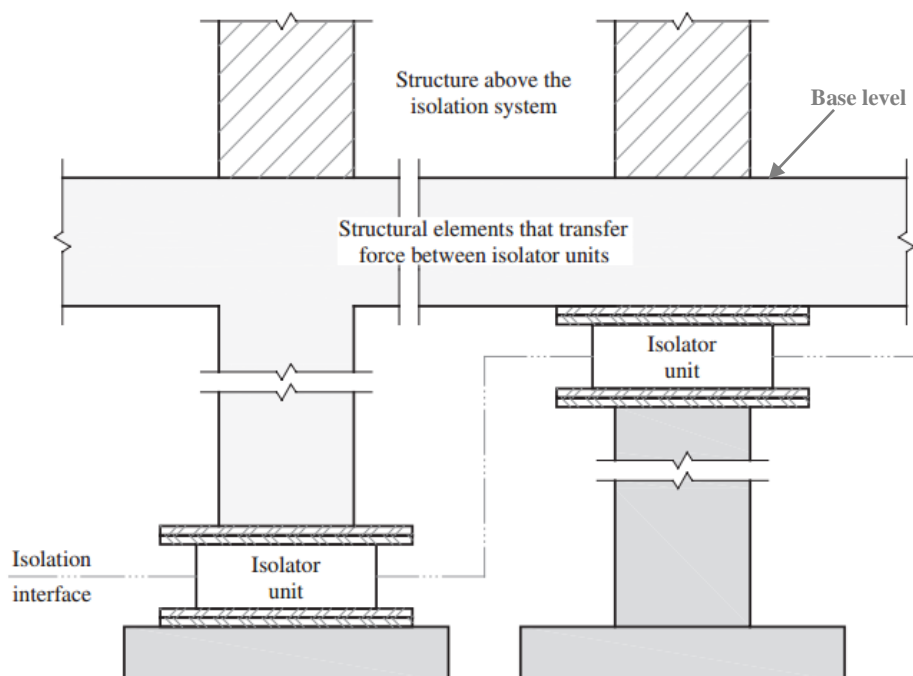


Figura 5.1 Terminología del sistema de aislación (ASCE, 2016)

2. Para los desplazamientos (Figura 5.2)

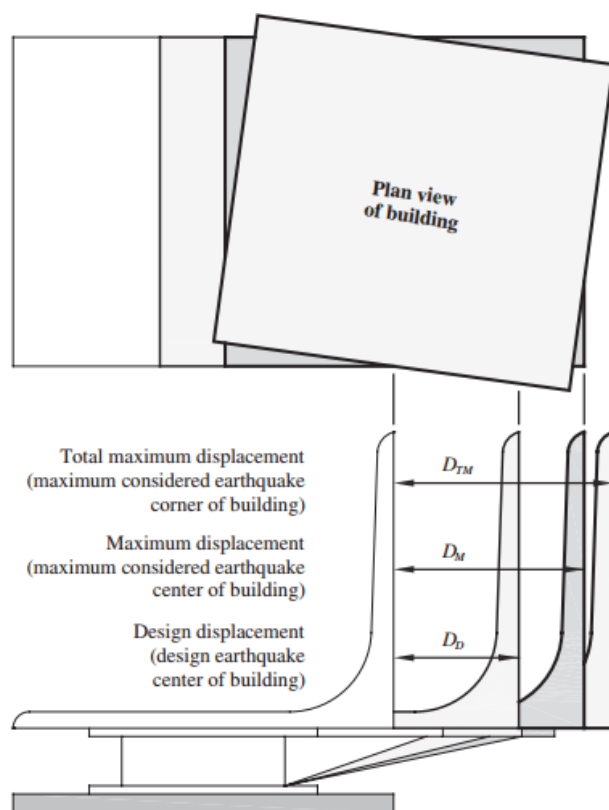


Figura 5.2 Terminología de desplazamientos (ASCE, 2016)

Principalmente se debe comprender la definición del desplazamiento máximo (D_M) y del desplazamiento total máximo (D_{TM}), este último incluye efectos de torsión.

5.3 Capacidad de restitución

La Sección 17.2.4.4 del ASCE7-16 establece que la fuerza de restitución (F_{res}) de un sistema de aislación sea al menos $0.025W$. La fuerza de restitución se define como la diferencia entre la fuerza horizontal correspondiente al 100% del desplazamiento máximo (D_M) y la fuerza horizontal correspondiente al 50% del desplazamiento máximo ($0.5D_M$). Al cumplir con este requisito, se está evitando que se produzcan desplazamientos permanentes en el sistema de aislación ante la ocurrencia de eventos sísmicos.

Usando la definición de fuerza de restitución, se tiene:

$$F_{res} = F(D_M) - F(0.5D_M) > 0.025W \quad (5.1)$$

donde:

F_{res} : Es la fuerza de restitución

$F(D_M)$: Es la fuerza horizontal (cortante basal) en el desplazamiento D_M

$F(0.5D_M)$: Es la fuerza horizontal en el 50% del desplazamiento D_M

Para sistemas de aislación que tiene un comportamiento histerético bilineal la fuerza de restitución puede ser calculado con la ecuación:

$$F_{res} = \frac{1}{2} K_d \cdot D_M > 0.025W \quad (5.2)$$

donde:

K_d : Es la rigidez post fluencia del sistema de aislación

Para aisladores FPT

Para determinar la fuerza de restitución en sistemas de aislación con aisladores FPT se necesita saber en qué fase de movimiento se encuentra el desplazamiento máximo (D_M). No obstante, en los casos típicos donde el sistema de aislación ha sido diseñado para operar en la tercera fase de movimiento (ver Figura 5.3), el cálculo de la fuerza de restitución se realiza de la siguiente manera:

Con referencia a la Figura 5.3 y a la definición de fuerza de restitución, se tiene:

$$F_{res} = K_3 \cdot D_M - K_3 \cdot (0.5D_M) > 0.025W$$

Simplificando,

$$F_{res} = \frac{K_3 \cdot D_M}{2} > 0.025W \quad (5.3)$$

donde:

K_3 : Es la rigidez post-fluencia en la tercera fase de movimiento (Ver Tabla 3.1).

$$K_3 = \frac{W}{R_{ef1} + R_{ef4}}$$

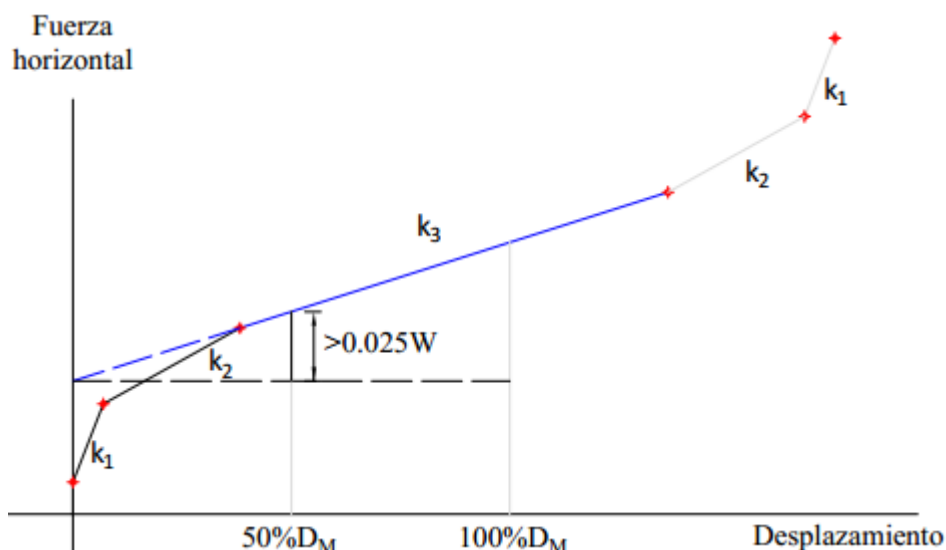


Figura 5.3 Fuerza de restitución en aisladores FPT que operan en la Fase III

Se insiste que la ecuación (5.3) es aplicable solo si el sistema de aislación opera en la tercera fase de movimiento, aunque conservativamente se podría aplicar en casos donde el sistema de aislación opera en la cuarta fase de movimiento, pero se advierte que al hacer esto se estaría subestimando la fuerza de restitución.

5.4 Factores de modificación de propiedades

Los factores de modificación de propiedades sirven para establecer los límites Upper Bound (UB) y Lower Bound (LB) del sistema de aislación, que son necesarios para definir los dos modelos de análisis requeridos por el Capítulo 17 del ASCE7-16.

Los límites Upper Bound y Lower Bound del sistema de aislación permiten considerar la variación de las propiedades nominales ante efectos como: el envejecimiento de los materiales, la contaminación, variación en la fabricación, entre otros.

El ASCE7-16 presenta las ecuaciones (C17.2-1) y (C17.2-2) para calcular el factor de modificación máximo (λ_{max}) y el factor de modificación mínimo (λ_{min}), respectivamente.

$$\lambda_{max} = (1 + 0.75(\lambda_{ac,max} - 1)) \lambda_{test,max} \cdot \lambda_{spec,max} \geq 1.80 \quad (C17.2-1)$$

$$\lambda_{min} = (1 - 0.75(1 - \lambda_{ac,min})) \lambda_{test,min} \cdot \lambda_{spec,min} \leq 0.60 \quad (C17.2-2)$$

donde:

λ_{ac} : Factor de modificación de propiedades para considerar los efectos de envejecimiento y condiciones ambientales.

λ_{test} : Factor de modificación de propiedades para considerar los efectos de calentamiento, velocidad de carga y “scragging”.

λ_{spec} : Factor de modificación de propiedades para tener en cuenta las variaciones en la fabricación.

En los aisladores FPT (y en general de los FPS), los factores λ_{max} y λ_{min} se aplican únicamente en los coeficientes de fricción debido a que los coeficientes de fricción son la única fuente de incertidumbre en este tipo de sistemas de aislación. Las propiedades geométricas se consideran que se fabrican con suficiente precisión de tal manera que no hace falta aplicar ningún factor de modificación de propiedades.

Nota: El prefijo C en las ecuaciones es para identificar que la ecuación ha sido extraída del ASCE7-16. Esto aplica a todas las ecuaciones posteriores que se obtienen del ASCE7-16.

5.5 Métodos de análisis

Existen 3 métodos para realizar el análisis de estructuras sísmicamente aisladas, estos son:

Método estático (Sección 17.5 ASCE7-16)

- ✓ Método de fuerza lateral equivalente (ELF)

Métodos dinámicos (Sección 17.6 ASCE7-16)

- ✓ Método de respuesta espectral (RSA)
- ✓ Método no lineal tiempo historia (NLRHA)

El método de análisis que se permite usar en una estructura con aislación sísmica depende de varios factores tales como: periodo efectivo de diseño, ubicación, altura e irregularidad de la estructura, entre otros. El método de fuerza lateral equivalente es el más restringido y se permite usar solo si cumple con los requisitos de la Sección 17.4.1 del ASCE7-16. El método de respuesta espectral se puede usar si se cumple los requisitos de la Sección 17.4.2.1 del ASCE7-16. Finalmente, el método de análisis no lineal tiempo historia se permite usar en todo tipo de estructuras, sin ninguna restricción. No obstante, si se aplica cualquiera de los dos procedimientos de análisis dinámico, los resultados siempre están limitados a los resultados del método de fuerza lateral equivalente.

Por lo tanto, el método de fuerza lateral equivalente debe realizarse en todos los casos ya sea para usarse para diseño o para controlar los resultados de los análisis dinámicos.

Seguidamente se presenta el método de análisis de fuerza lateral equivalente (Sección 5.5.1) y el método de análisis no lineal tiempo historia. Se consideran únicamente estos dos métodos debido a que son los más usados para el análisis de estructuras sísmicamente aisladas. Además, se incluyen algunas consideraciones que son aplicables solo a los aisladores FPS, que no están en el Capítulo 17 del ASCE7-16.

5.5.1 Método de fuerza lateral equivalente (ELF)

Se debe realizar el análisis para propiedades Lower Bound y Upper Bound del sistema de aislación. El método de análisis de fuerza lateral equivalente (ELF, por sus siglas en inglés) es un método lineal e iterativo. Este es un método sencillo y de fácil implementación, pero que proporciona resultados bastante razonables.

El método considera que la estructura aislada es lo suficientemente rígida de tal manera que se puede ignorar su flexibilidad. De esta manera el análisis sísmico se realiza asumiendo a la estructura aislada como un modelo de 1GDL (Ver Figura 4.6 – Sección 4.4).

Los desplazamientos y cortantes basales de diseño se determinan usando las ecuaciones que se presenta a continuación:

Desplazamiento lateral mínimo requerido para diseño

Para determinar el desplazamiento máximo (D_M) y el desplazamiento total máximo (D_{TM}) se deben usar las ecuaciones de la Tabla 5.1.

| Parámetro | Símbolo | Ecuación | Ecuación, Tabla o Referencia ASCE 7-16 |
|-----------------------------|-----------|--|--|
| Desplazamiento máximo | D_M | $D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M}$ | (C17.5-1) |
| Periodo efectivo | T_M | $T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_M g}}$ | (C17.5-2) |
| Factor de amortiguamiento | B_M | $B_M = \left(\frac{\beta_M}{0.05}\right)^{0.3}$ (Ecuación AASHTO) | -- |
| | | (Ver Tabla 17.5-1) | Tabla 17.5-1 |
| Rigidez efectiva | K_M | $K_M = \frac{\sum F_M^+ + \sum F_M^- }{2D_M}$ | (C17.2-3) |
| Amortiguamiento efectivo | β_M | $\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi K_M D_M^2}$ | (C17.2-4) |
| Desplazamiento total máximo | D_{TM} | $1.15 D_M$ | Sección 17.5.3.3 |

donde:

g : aceleración de gravedad (in/seg²).

S_{M1} : parámetro de aceleración espectral en periodo de 1 segundo (g).

T_M : periodo efectivo de la estructura sísmicamente aislada (seg), en el desplazamiento D_M .

B_M : coeficiente numérico para el amortiguamiento efectivo β_M , en el desplazamiento D_M .

W : carga sísmica efectiva de la estructura sobre la interface de aislación (kip).

K_M : rigidez efectiva del sistema de aislación en el desplazamiento máximo D_M (kip/in).

$\sum E_M$: es la energía total disipada del sistema de aislación en un ciclo de histéresis (kips-in).

$|F_M^+|$: suma, para todas unidades de aisladores, del valor de fuerza absoluta en un desplazamiento positivo igual a D_M .

$|F_M^-|$: suma, para todas unidades de aisladores, del valor de fuerza absoluta en un desplazamiento negativo igual a D_M .

Tabla 5.1 Desplazamientos para diseño si se aplica el método de análisis ELF

En la Tabla 5.1, se presenta la ecuación (7.1-3) de la norma AASHTO “Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 4th Edition” (AASHTO, 2014) como alternativa al uso de la Tabla 17.5-1 del ASCE7-16.

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| Amortiguamiento efectivo, β_M | ≤ 2 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | ≥ 50 |
| Factor de amortiguamiento, B_M | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 1.7 | 1.9 | 2.0 |

Tabla 5.2 Factor de amortiguamiento (Tabla 17.5-1 del ASCE7-16)

Por otro lado, para calcular el desplazamiento total máximo (D_{TM}), no se ha considerado el uso de la ecuación (17.5.3) de la Sección 17.5.3.3 del ASCE 7-16. Esto debido a que los sistemas de aislación con aisladores FPS son capaces de minimizar o eliminan los movimientos torsionales (FEMA, 2016; SEAOC, 2014) y por lo tanto D_M debería ser igual a D_{TM} . Sin embargo, el ASCE especifica que en ningún caso el desplazamiento total máximo puede ser menor que el 15% del desplazamiento máximo. Por lo tanto, se considera que $D_{TM} = 1.15D_M$.

Fuerzas laterales mínimas requeridas para diseño

En la Tabla 5.3 se presentan las ecuaciones para calcular las fuerzas de diseño en el sistema de aislación y en elementos estructurales que están bajo el nivel de base (ecuación C17.5-5); y en elementos estructurales que están sobre el nivel de base (ecuaciones C17.5-6).

| Parámetro | Símbolo | Ecuación | Ecuación ASCE 7-16 |
|---|----------------------|--|--------------------|
| Sistema de aislación y elementos estructurales bajo el nivel de base | V_b | $V_b = K_M D_M$ | (C17.5-5) |
| Elementos estructurales sobre el nivel de base | V_s | $V_s = \frac{V_{st}}{R_I}$ | (C17.5-6) |
| | Tal que: V_{st} | $V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{1-2.5\beta_M}$ | (C17.5-7) |

donde:
 R_I : factor de modificación de respuesta para el diseño de la superestructura. R_I se calcula como $3/8 R$, sujeto al límite $1.0 < R_I < 2.0$.
 V_{st} : fuerza cortante no reducida que actúa sobre los elementos del nivel de base.
 W : carga reactiva de la estructura sobre la interface de aislación
 W_s : carga reactiva de la estructura sobre la interface de aislación, excluyendo la carga reactiva del nivel de base.

Tabla 5.3 Contantes basales requeridos para diseño si se aplica el método de análisis ELF

En cortante basal, V_s , para elementos estructurales sobre el nivel de base que se calcula con la ecuación (C17.5-6), está sujeto a los límites de la Sección 17.5.4.3 del ASCE7-16, estos límites se muestran a continuación:

Límites de V_s , Sección 17.5.4.3 ASCE7-16

En ningún caso V_s , puede ser menor a los límites establecidos a continuación:

| |
|---|
| <p>1. La fuerza lateral requerida por la Sección 12.8 para una estructura empotrada asociada con un carga sísmica, W_s, y un periodo igual al periodo aislador, T_{M_UB}.</p> <p>Sección 12.8.1</p> $V = C_s W \quad (\text{Ecuación C12.8-1})$ <p>C_s se calcula con</p> $C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (\text{Ecuación C12.8-2})$ <p>Pero C_s no debe exceder:</p> <ul style="list-style-type: none"> Para $T \leq T_L$ $C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (\text{Ecuación C12.8-3})$ Para $T > T_L$ $C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (\text{Ecuación C12.8-4})$ <p>C_s no debe ser menor que:</p> $C_s = 0.044 S_{DS} I_e \geq 0.01 \quad (\text{Ecuación C12.8-5})$ <p>Adicionalmente, para estructuras en sitios donde $S_1 \geq 0.6g$, C_s no debe ser menor que:</p> $C_s = \frac{0.5 S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (\text{Ecuación C12.8-6})$ |
| 2. El cortante en la base correspondiente a la carga de viento de diseño factorizada |
| 3. La fuerza lateral V_{st} , calculado usando la Ecuación (C17.5.7) con V_b igual a la fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislación, usando las propiedades más altas de Upper Bound |
| 3a. 1.5 veces las propiedades nominales para el nivel de fluencia de un sistema de ablandamiento. |
| 3b. La capacidad máxima de un sistema sacrificial de contención de viento. |
| 3c. Fuerza de fricción de rotura en un sistema de deslizante |
| 3d. La fuerza en el desplazamiento cero de un sistema deslizante después de un ciclo dinámico completo de movimiento en D_M |

Tabla 5.4 Límites de V_s , para diseño de la superestructura.

5.5.2 Método de análisis no lineal tiempo historia (NLRHA)

Se debe realizar el análisis para propiedades Lower Bound y Upper Bound del sistema de aislación.

El método NLRHA es el método de análisis más exacto, ya que requiere considerar el comportamiento no lineal del sistema de aislación. Sin embargo, así como trae ventajas en los resultados (mayor precisión), el método viene acompañado de una mayor complejidad.

Para aplicar el método NLRHA, se requiere:

- ✓ Que los modelos de análisis cumplan con los requisitos de la Sección 17.6.2 del ASCE7-16.
- ✓ Un mínimo de 7 pares de registros sísmicos que deben estar escalados al espectro de aceleraciones MCE que tiene una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años.
- ✓ El rango de periodos para el escalamiento debe estar entre $0.75T_M$ (T_M calculado para las propiedades “Upper Bound” del sistema de aislación) y $1.25T_M$ (T_M calculado para las propiedades “Lower Bound” del sistema de aislación).

Hay que tener en cuenta que los resultados del método NLRHA no se pueden usar directamente para diseño, sino que deben ser comparados con los resultados del método ELF. Sin embargo, para realizar la comparación es posible reducir los límites del método ELF, estos límites presentan a continuación:

Desplazamiento lateral mínimo requerido para diseño

Desplazamiento máximo (D_M) y desplazamiento total máximo (D_{TM})

ASCE7-16 Sección 17.6.4.1 permite reducir un 20% del desplazamiento máximo (D_M) calculado con el método ELF, además se permite remplazar D_M por D'_M , en donde D'_M se calcula con la ecuación (C17.6-1)

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T/T_M)^2}} \quad (C17.6-1)$$

donde:

T: es el periodo de base fija de la estructura

T_M : es el periodo efectivo del sistema de aislación (se calcular para LB y UB)

Fuerzas laterales mínimas requeridas para diseño

Cortante basal, V_b , para el sistema de aislación y elementos estructurales bajo el nivel de base

ASCE7-16 Sección 17.6.4.1 permite reducir a 90% V_b , en donde V_b es el cortante calculado con el método ELF.

Cortante basal (V_s) para elementos estructurales sobre el nivel de base

- ✓ Para estructuras regulares, se permite usar el 80% V_s , y
- ✓ Para estructuras irregulares, no se permite reducción, por lo tanto, se debe usar el 100% V_s .

En donde V_s es el cortante calculado con el método ELF.

Además, en ningún caso, V_s , puede ser menor que los límites de la Sección 17.5.4.3 del ASCE7-16, presentados en la Tabla 5.4 de este documento.

En resumen, se presentan la Tabla 5.5. También se presenta los límites para las derivas de entrepiso.

| Parámetro de diseño | Método ELF | Método NLRHA |
|---|-----------------------|--------------------|
| Desplazamiento Total Máximo - D_{TM} | $D_{TM} \geq 1.15D_M$ | $\geq 80\%D_{TM}$ |
| Cortante basal - V_b | V_b | $\geq 90\%V_b$ |
| Cortante basal - V_s (Estructura regular) | V_s | $\geq 80\%V_s$ |
| Cortante basal - V_s (Estructura irregular) | V_s | $\geq 100\%V_s$ |
| Derivas (Usando R_I igual a C_d) | $\leq 0.015h_{sx}$ | $\leq 0.020h_{sx}$ |

Tabla 5.5 Requisitos mínimos de diseño si se usa el método NLRHA

Capítulo 6: Caso de estudio

6.1 Introducción

Se presenta un ejemplo completo de diseño y análisis sísmico del sistema de aislación, compuesto por aisladores de triple péndulo de fricción (FPT), para un edificio de acero de 6 pisos. El edificio de acero de 6 pisos, así como la información del peligro sísmico, fue tomado del Manual de Diseño Sísmico 2012 IBC, Volumen 5 (SEAOC, 2014). El “Manual” es una guía para diseñar sistemas de aislación, pero que está basado en la norma ASCE7-10 y en el uso de modelos simplificados de curva de histéresis de los aisladores. En contraste, el presente ejemplo se realiza cumpliendo la nueva norma ASCE7-16 y usando un modelo de curva de histéresis que permite representar el comportamiento real de los aisladores, además, se incrementa el nivel de detalle en los cálculos.

6.2 Información del proyecto

6.2.1 Descripción del edificio

La estructura a aislar corresponde a un edificio de acero de 6 pisos (destinado para oficinas), con alturas de entrepiso de 12 ft (72 ft en total); dimensión en planta de 150 ft x 150 ft dividido en 5 vanos de 30 ft, en ambas direcciones. El sistema resistente a cargas sísmicas es de tipo “Special Concentrically Braced Frame (SCBF)”.

En las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se muestran la vista en 3D, en planta y en elevación, del edificio.

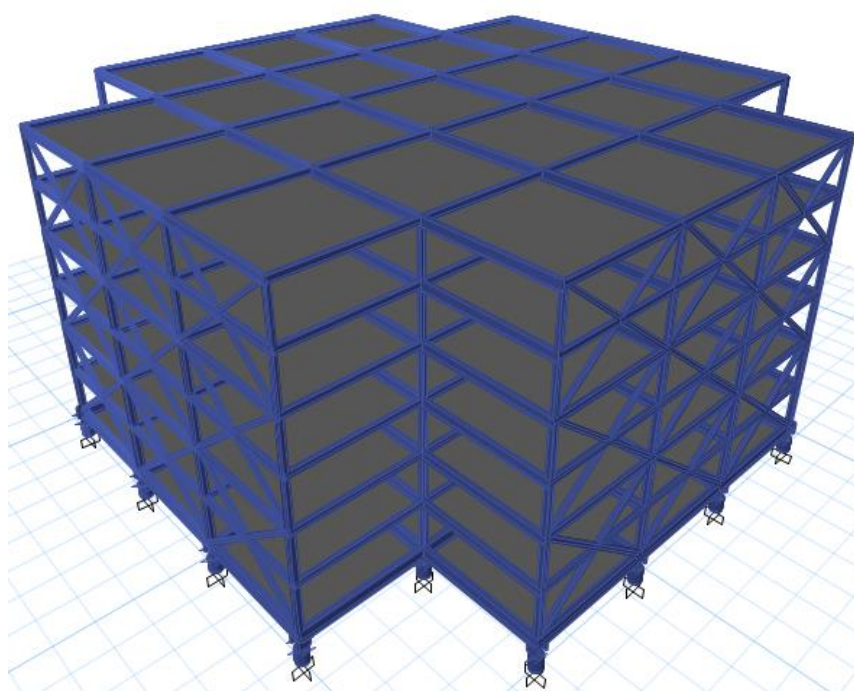
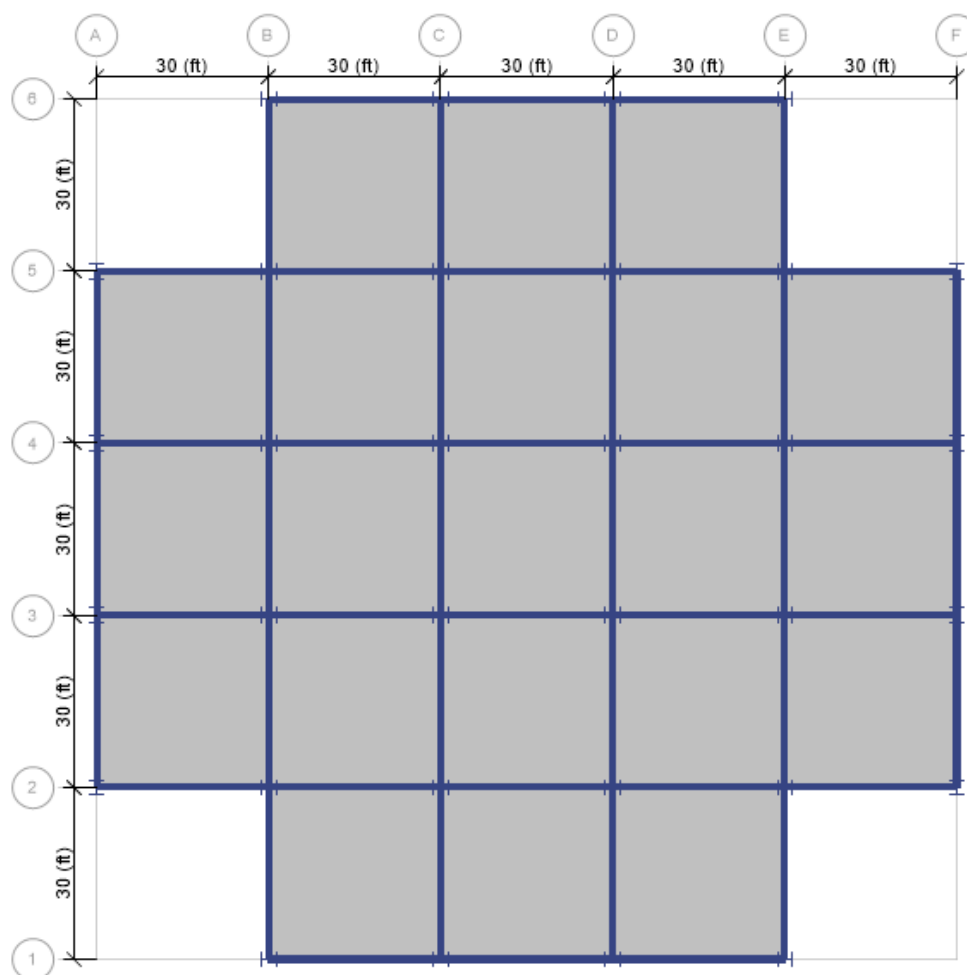
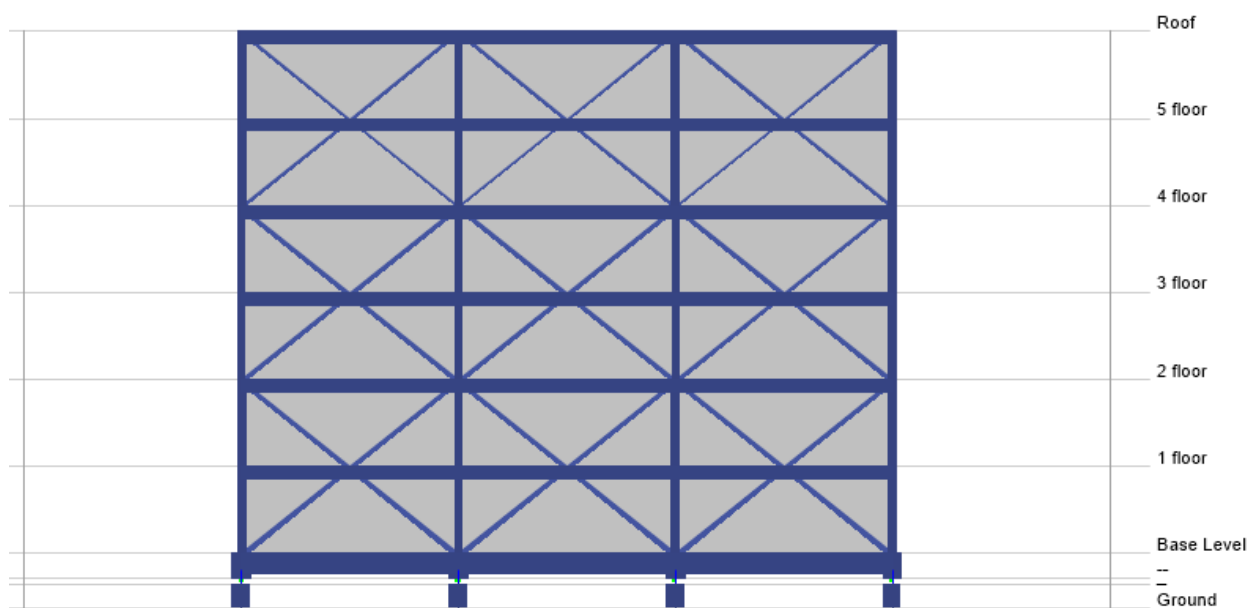


Figura 6.1 Vista 3D

**Figura 6.2** Planta típica**Figura 6.3** Elevación

6.2.2 Cargas del edificio

Las cargas gravitacionales que actúan en el edificio se muestran a continuación:

Piso Típico

| Dead Loads | Gravity Load | Effective ³ Seismic Weight |
|---|-------------------|---------------------------------------|
| Floor finish | 5 psf | 5 psf |
| 2-in, 18-ga. deck | 2.7 psf | 2.7 psf |
| 3/4-in light-weight concrete fill | 39.0 psf | 39.0 psf |
| Steel framing | N/A ⁴ | N/A ⁴ |
| Mechanical / Plumbing / Electrical | 4 psf | 4 psf |
| Ceiling | 4 psf | 4 psf |
| Partitions | Under "Live Load" | 10 psf ⁴ |
| Miscellaneous | 3 psf | 3 psf |
| Total Dead Load | 57.7 psf | 67.7 psf |
| Office Building Live Loads ^{1,2} | | Live Load |
| All Floors and Stairs = 100 psf | | 100 psf |

Muros exteriores

| Dead Loads | Gravity Load | Effective ³ Seismic Weight |
|---------------------|--------------|---------------------------------------|
| Cladding | 7 psf | 7 psf |
| Metal studs | 2 psf | 2 psf |
| Insulation | 2 psf | 2 psf |
| 5/8-in gypsum board | 3 psf | 3 psf |
| Miscellaneous | 5 psf | 5 psf |
| Total Dead Load | 19 psf | 19 psf |

Cubierta

| Dead Loads | Gravity Load | Effective ³ Seismic Weight |
|------------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| Built-up roof | 6 psf | 6 psf |
| Insulation | 2 psf | 2 psf |
| Metal roof deck | 4 psf | 4 psf |
| Steel framing | N/A ⁴ | N/A ⁴ |
| Mechanical / Plumbing / Electrical | 4 psf | 4 psf |
| Ceiling | 4 psf | 4 psf |
| Partitions | 0 psf | 5 psf ⁴ |
| Miscellaneous | 3 psf | 3 psf |
| Total Dead Load | 23 psf | 28 psf |
| Roof Live Loads ¹ | | Live Load |
| Ordinary Flat Roof | | 20 psf |

Cargas totales

El cálculo de la carga muerta y viva del edificio se resumen en la Tabla 6.1.

|  | Nivel | Carga muerta (kips) | Carga Viva (kips) |
|---|---------------------|---------------------|-------------------|
| | Cubierta | 598 | 378 |
| | Piso 5 | 1416 | 1890 |
| | Piso 4 | 1416 | 1890 |
| | Piso 3 | 1416 | 1890 |
| | Piso 2 | 1416 | 1890 |
| | Piso 1 | 1416 | 1890 |
| | Nivel Base | 1416 | 1890 |
| | Estructura de acero | 932 | - |
| | TOTAL | 10028 | 11718 |

Tabla 6.1 Cargas actuantes en el edificio

De este modo la carga muerta y la carga viva del edificio son:

- ✓ Carga muerta total = 10028 kips → Carga reactiva (W)
- ✓ Carga viva total = 11718 kips

6.2.3 Peligro sísmico

El edificio se encuentra localizado en San Francisco (California - Estados Unidos). El sitio está clasificado como tipo D.

Los parámetros para obtener el espectro máximo considerado (MCE), se muestran en la Tabla 6.2.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|--------------------------|-------|--------|
| S_S | 1.5 | g |
| S_1 | 0.6 | g |
| F_a (Sitio clase D) | 1 | - |
| F_v (Sitio clase D) | 1.5 | - |
| $S_{MS} = F_a \cdot S_S$ | 1.5 | g |
| $S_{M1} = F_v \cdot S_1$ | 0.9 | g |
| T_o | 0.12 | seg |
| T_S | 0.6 | seg |
| T_L | 12 | seg |

Tabla 6.2 Parámetros del espectro de aceleraciones MCE

donde:

S_S : Aceleración espectral a 0.2 seg.

S_1 : Aceleración espectral a 1 seg.

F_a : Factor de sitio para aceleración a periodo de 0.2 seg.

F_V : Factor de sitio para aceleración a periodo de 1 seg.

S_{MS} : Aceleración espectral MCE para periodos cortos

S_{M1} : Aceleración espectral MCE al periodo de 1 segundo

$T_o = 0.2(S_{D1}/S_{DS})$

$T_s = S_{D1}/S_{DS}$

T_L : Periodo de transición para periodos largos

Los parámetros para el nivel de sismo DE, se obtiene dividiendo el espectro MCE para 1.5.

Con los parámetros de la Tabla 6.2 se calcula el espectro de aceleración MCE (periodo de retorno de 2500 años con 2% de probabilidad de ser excedido en 50 años), este se muestra en la Figura 6.4.

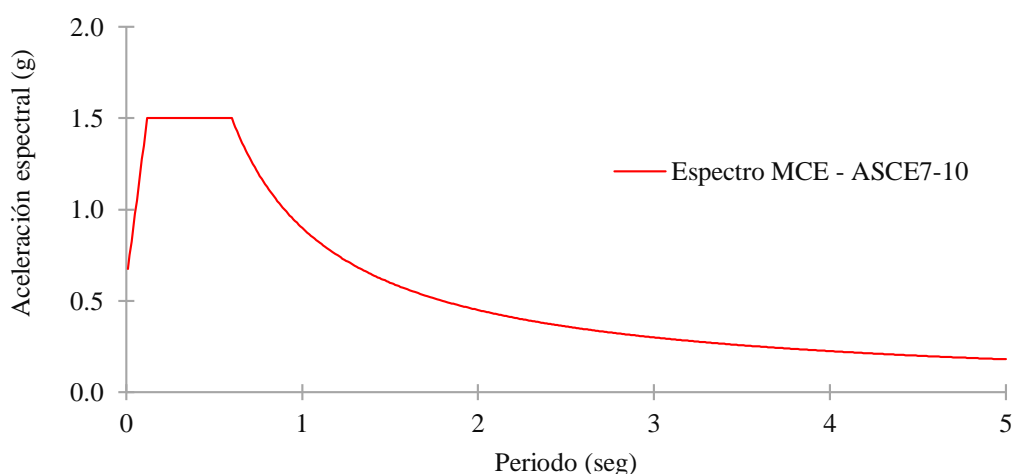


Figura 6.4 Espectro de aceleraciones MCE - ASCE7-10

6.2.4 Registros sísmicos

Para aplicar el método dinámico NLRHA (Sección 5.5.2), el ASCE7-16 requiere un mínimo de 7 pares de registros sísmicos que deben estar escalados al espectro de aceleraciones MCE.

Los registros sísmicos seleccionados se muestran en la Tabla 6.3.

| EQ | SISMO PEER # | Earthquake Name | Station Name | Year | Magnitude | Mechanism |
|----|--------------|-------------------------|---------------------------|------|-----------|-------------|
| 1 | RSN175 | "Imperial Valley-06" | "El Centro Array #12" | 1979 | 6.53 | strike slip |
| 2 | RSN1158 | "Kocaeli_ Turkey" | "Duzce" | 1999 | 7.51 | strike slip |
| 3 | RSN728 | "Superstition Hills-02" | "Westmorland Fire Sta" | 1987 | 6.54 | strike slip |
| 4 | RSN864 | "Landers" | "Joshua Tree" | 1992 | 7.28 | strike slip |
| 5 | RSN187 | "Imperial Valley-06" | "Parachute Test Site" | 1979 | 6.53 | strike slip |
| 6 | RSN549 | "Chalfant Valley-02" | "Bishop - LADWP South St" | 1986 | 6.19 | strike slip |
| 7 | RSN458 | "Morgan Hill" | "Gilroy Array #4" | 1984 | 6.19 | strike slip |

Tabla 6.3 Registros sísmicos seleccionados

Escalamiento de sismos

El método que generalmente se emplea para escalar los sismos consiste en determinar factores de escala. Estos factores se obtienen mediante un proceso de escalamiento de los espectros de respuesta elásticos de cada sismo. Esto se realiza a continuación:

Los espectros de respuesta elásticos SRSS (al 5% de amortiguamiento respecto al crítico) de los siete sismos y el espectro de aceleraciones MCE se muestran en la Figura 6.5.

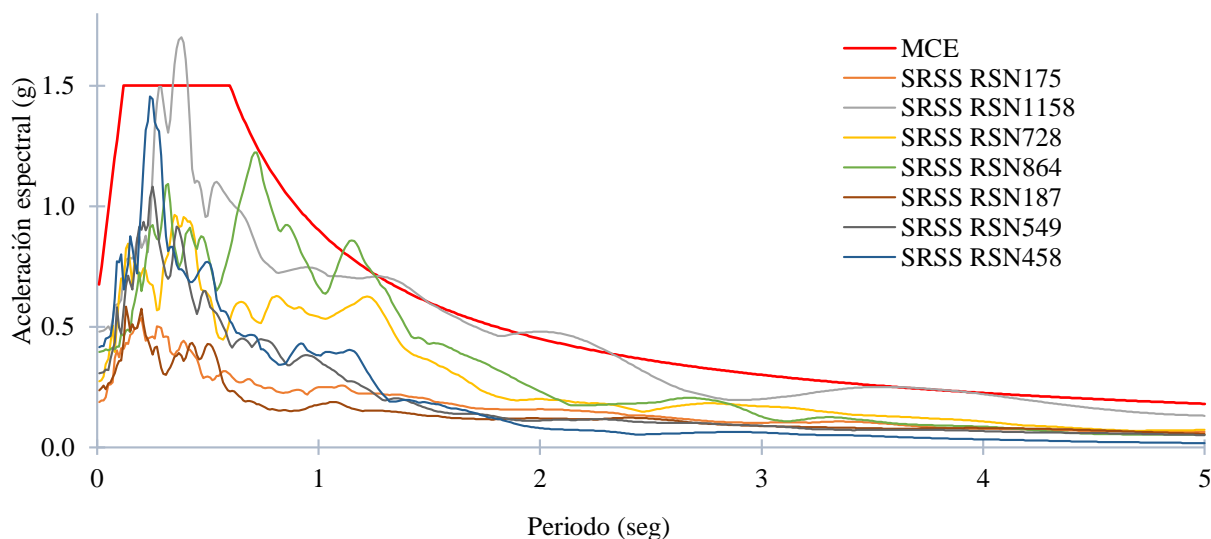


Figura 6.5 Espectros de respuesta elásticos SRSS de los 7 sismos y espectro MCE

Antes de continuar con el proceso de escalamiento es necesario precisar el periodo objetivo y el correspondiente rango de periodos, esto se realiza seguidamente:

Como se dijo en la Sección 5.5.2, el rango de periodos para el escalamiento de sismos debe estar entre $0.75T_M$ (T_M calculado para las propiedades “Upper Bound” del sistema de aislación) y $1.25T_M$ (T_M calculado para las propiedades “Lower Bound” del sistema de aislación). Pero al no disponer aún de las propiedades del sistema de aislación, se opta por asumir un rango de periodos entre 1.5 seg a 5.0 seg, con un periodo objetivo de 3.0 seg. Se eligió un amplio rango de periodos con la finalidad de considerar varias opciones de aislación sísmica, opciones que serán consideradas en el diseño del sistema de aislación (Sección 6.3).

Factor de escala 1 (SF_1)

El factor de escala, SF_1 , se calcula para cada sismo, y se obtiene dividiendo la componente espectral del espectro MCE en el periodo objetivo ($Sa_{MCE_{T=3.0\text{seg}}}$) para la componente espectral de cada sismo en el periodo objetivo ($Sa_{n(T=3.0\text{seg})}$, para $n=1, 2, \dots, 6, 7$). Los factores de escala calculados se muestran en la Tabla 6.4 y el resultado de aplicar estos factores a los correspondientes espectros de cada sismo se muestra en la Figura 6.6.

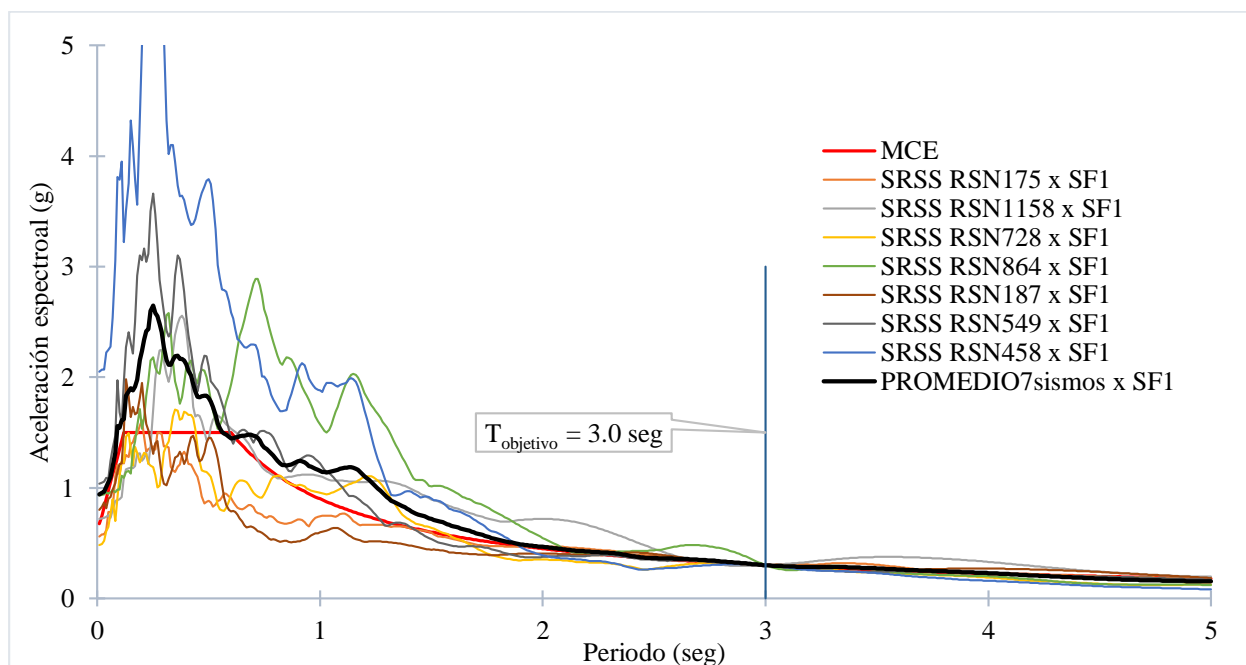


Figura 6.6 Espectros SRSS escalados por SF_1

Factor de escala 2 (SF_2)

Este factor de escala, SF_2 , es el mismo para todos los sismos, y es igual al “**máximo factor**” de entre los factores que resultan de dividir las componentes espectrales del espectro MCE para las correspondientes componentes espectrales del espectro “*PROMEDIO7sismosxSF₁*” (ver el espectro “*PROMEDIO7sismosxSF₁*” en la Figura 6.6), en el rango de periodos de 1.5seg a 5.0seg. Se usa el **máximo factor** para asegurar que el espectro “*PROMEDIO7sismosxSF₁*” quede sobre el espectro MCE en todo el rango de periodos, es decir de 1.5seg a 5.0seg. El factor de escala calculado se muestra en la Tabla 6.4 y el resultado de aplicar este factor al espectro “*PROMEDIO7sismosxSF₁*” se muestra en la Figura 6.7.

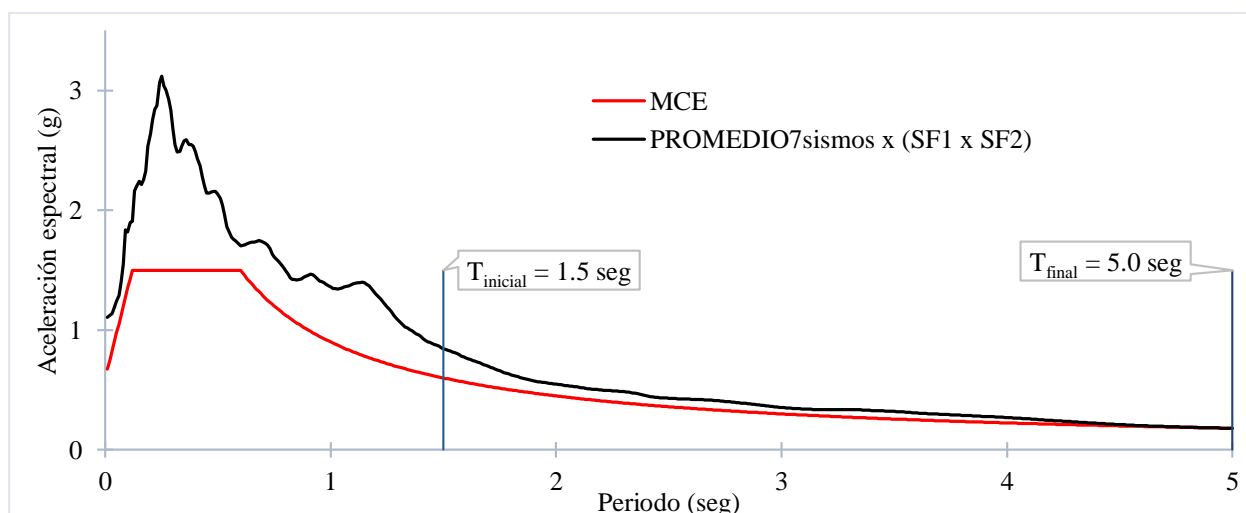


Figura 6.7 Espectro “*PROMEDIO7sismos x SF₁*” escalado por $(SF_1 \times SF_2)$

A continuación se presenta la Tabla 6.4 con los factores de escala calculados (SF_1 y SF_2), y el factor de escala total (SF_{MCE}), donde el factor de escala total (SF_{MCE}) se calcula como el producto de los factores SF_1 y SF_2 . El factor de escala SF_{MCE} es el que usa para escalar los sismos.

| EQ | SISMO PEER # | SF_1 | SF_2 | SF_{MCE} | $SF_{MCE} \times g (g=386.4in/s^2)$ |
|----|--------------|--------|--------|------------|-------------------------------------|
| 1 | RSN175 | 2.00 | 1.178 | 3.53 | 1364 |
| 2 | RSN1158 | 1.00 | 1.178 | 1.77 | 683 |
| 3 | RSN728 | 1.18 | 1.178 | 2.09 | 806 |
| 4 | RSN864 | 1.58 | 1.178 | 2.78 | 1076 |
| 5 | RSN187 | 2.27 | 1.178 | 4.00 | 1547 |
| 6 | RSN549 | 2.26 | 1.178 | 3.99 | 1541 |
| 7 | RSN458 | 3.29 | 1.178 | 5.81 | 2245 |

Tabla 6.4 Factores de escala para los siete registros sísmicos

Los espectros escalados en el rango de interés se muestran en la Figura 6.8.

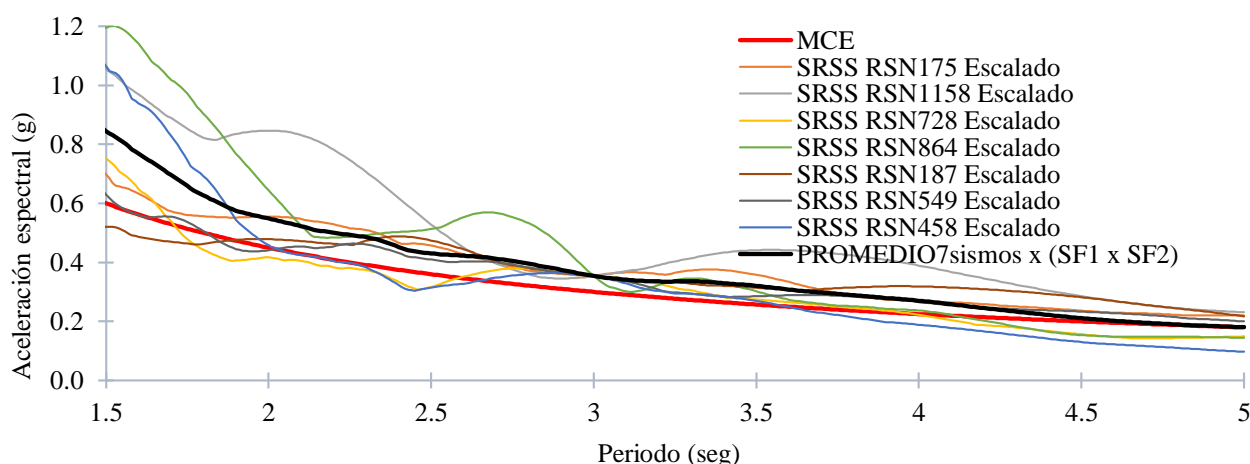


Figura 6.8 Espectros SRSS escalados en el rango de interés

6.3 Diseño del aislador FPT

6.3.1 Objetivos de diseño

Para el presente caso de estudio, se asume que el objetivo de diseño es de reducir el desplazamiento de diseño, de tal manera que el tamaño del aislador FPT sea el menor posible. También se tratará de reducir el cortante basal.

6.3.2 Ubicación de aisladores

En planta, se coloca un aislador FPT en cada columna (dando un total de 32 aisladores), y en elevación (interfaz de aislación) se ubican bajo la losa de la planta baja y sobre pedestales de hormigón armado, tal como se muestra en la Figura 6.9.

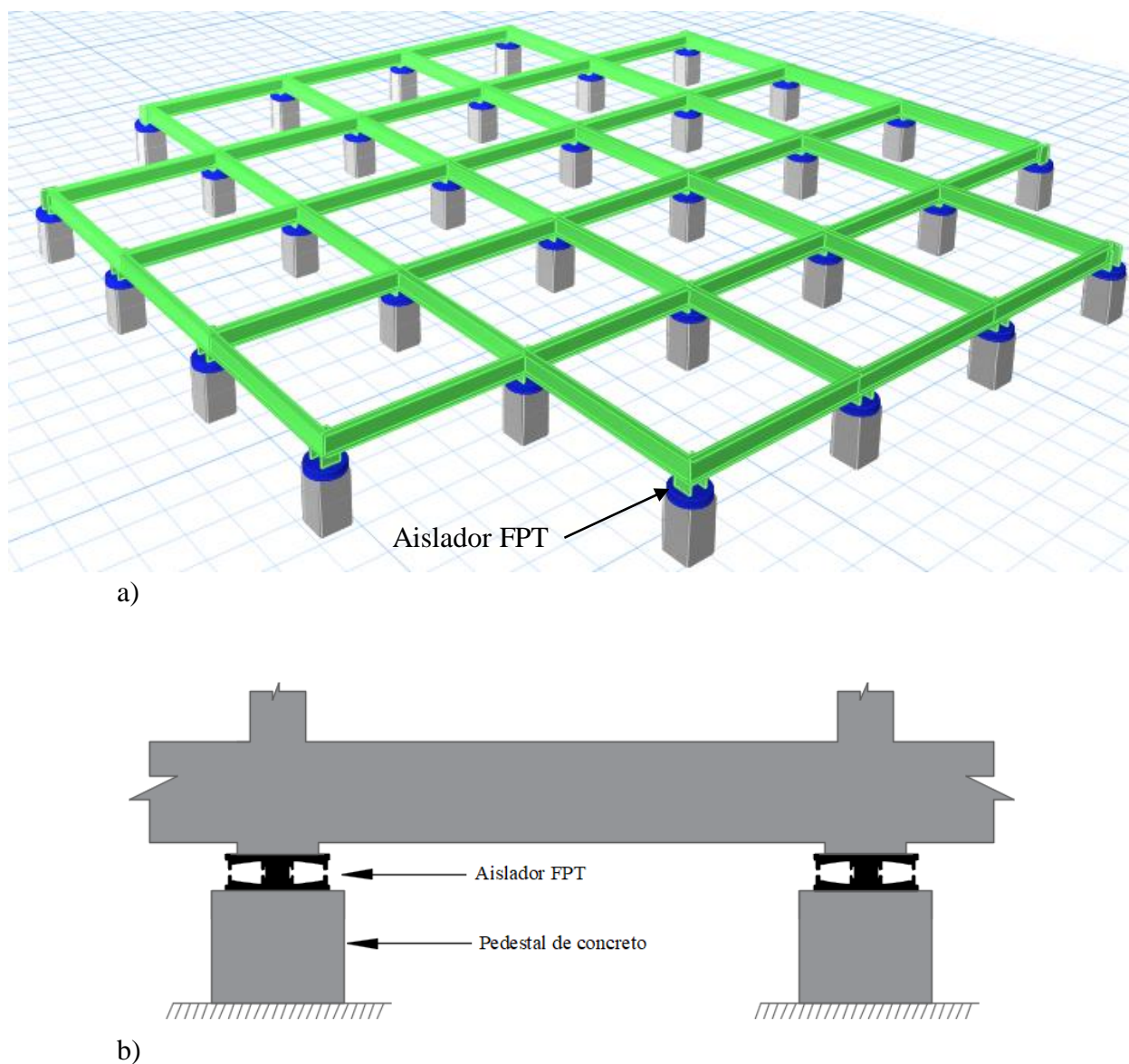


Figura 6.9 Ubicación de aisladores a) vista isométrica b) vista en elevación

6.3.3 Diseño preliminar

El diseño preliminar se realiza usando el procedimiento descrito en la Sección 4.4 usando el software OpenSees (para realizar los múltiples NLRHA).

Además, se establece que el rango de operación del aislador FPT sea desde la fase I hasta la fase III, quedando la fase IV y V como reserva.

Paso 1: Definir los aisladores que se van analizar

Teniendo en cuenta las recomendaciones que se dieron en el Paso 1 de la Sección 4.4.1, se tiene:

Alturas (h_i):

Para establecer las alturas, $h_2 = h_3$, se usa el criterio de estabilidad del deslizador rígido, es decir que la altura ($h_2 + h_3$) dividido para el diámetro (D_R) debe ser menor a la unidad. Para esto, se realizó un cálculo aproximado del diámetro (D_R) usando la carga promedio que llega a los aisladores.

$$\text{Carga promedio (P}_{\text{med}}) = \frac{1.2 \times 10028 \text{ kips} + 1.6 \times 11718 \text{ kips}}{32} = 962 \text{ kips}$$

$$D_R \geq \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{962 \text{ kips}}{40 \text{ ksi}} \right)} = 6 \text{ in} \rightarrow D_R = 8 \text{ in (asumido)}$$

Aplicando el criterio de estabilidad, se tiene

$$\frac{h_2 + h_3}{D_R} \leq 1.0 \rightarrow h_2 \leq 4.0 \text{ in} \rightarrow h_2 = 3.5 \text{ in (asumido)}$$

Para las alturas, $h_1 = h_4$, se considera que el espesor de las placas 2 y 3 en el centro es igual a 1 in,

$$h_1 + h_4 \geq h_2 + h_3 + 2 \text{ in} \rightarrow h_1 = 4.5 \text{ in}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_3 = 3.5 \text{ in} \\ h_1 &= h_4 = 4.5 \text{ in} \end{aligned}$$

Estas alturas se usan para todos los aisladores que se van a analizar.

Radios de curvatura (R_i)

Los radios de curvatura para las superficies externas ($R_1 = R_4$) se obtienen de la Tabla 4.2. Para el ejemplo, se seleccionan radios de 88 in y 155 in, de esta manera, los radios efectivos corresponden a 83.5 in y 151.5 in calculados con las alturas $h_1 = h_4 = 4.5 \text{ in}$.

Los radios de curvatura efectivos de las superficies internas ($R_{ef2} = R_{ef3}$) se asumen para ser los mismos que los presentados en el Manual (SEAO, 2014), estos son: 5.5, 12, 23 y 33 in. Usando $h_2 = h_3 = 3.5 \text{ in}$, se obtienen los radios de curvatura ($R_2 = R_3$), esto son: 9, 15.5, 26.5 y 36.5 in.

Coefficientes de fricción (μ_i)

Los coeficientes de fricción de las superficies externas ($\mu_1 < \mu_4$) se hacen variar desde 5% hasta 10% con incrementos de 1%, aunque, para este ejemplo las fricciones de 9% y 10% solo se usan para estudiar el comportamiento y no serán usados para diseño.

En el caso de los coeficientes de fricción de las superficies internas ($\mu_2 = \mu_3$), se establece un valor constante e igual a 2%, esto debido a la poca influencia en los parámetros de respuesta que

se quieren controlar (desplazamientos y cortantes basales, ver Sección 6.3.1). Sin embargo, estos coeficientes de fricción si tienen un efecto importante en las aceleraciones de piso, por lo tanto, en el caso que se requiera controlar las aceleraciones de piso, se debe variar este coeficiente de fricción con la finalidad de estudiar su efecto.

Paso 2: Múltiples NLRHA en OpenSees

Acerca del OpenSees

El software OpenSees puede ser obtenido libremente de la página oficial: <http://opensees.berkeley.edu/>
El código fuente para el aislador FPT fue desarrollado por Nhan D. Dao de la Universidad de Nevada – Reno y puede ser obtenido del siguiente link: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Triple_Friction_Pendulum

Nota: Previo a desarrollar los múltiples NLRHA, el código fuente de OpenSees fue modificado y adaptado convenientemente a Matlab por el Ing. Francisco Flores, Director de este Trabajo de Titulación.

Se decidió usar OpenSees para los análisis debido a que este Software posee un modelo matemático que simula el comportamiento real del aislador FPT, es decir, las 5 fases de movimiento de Fenz & Constantinou (2008a) que se describió en la Sección 3.4. El modelo matemático que usa OpenSees se denomina como *modelo en serie* (Dao et al., 2013) y es igual al usado en Etabs (ver Sección 6.7.1).

Los sismos y sus correspondientes factores de escala para los múltiples NLRHA se presentaron en la Sección 6.2.4.

Información requerida en OpenSees

Para cada análisis en OpenSees se requiere establecer: la carga sobre el aislador, las propiedades del aislador FPT, y también los parámetros de convergencia, estos se describen a continuación:

- ✓ **Carga sobre el aislador (W):** Se asume $W=1$ kip debido a que el comportamiento de los aisladores FPT no dependen del peso soportado.
- ✓ **Radios de curvatura efectivos (R_{efi}):** Establecidos en el paso 1.
- ✓ **Coefficientes de fricción (μ_i):** Establecidos en el paso 1. Además, por facilidad, en un principio, se asume que los coeficientes de fricción en ambas superficies son iguales ($\mu_1 = \mu_4$). Al realizar esta consideración, el comportamiento del aislador FPT se simplifica de las 5 fases a 3 fases de movimiento (McVitty & Constantinou, 2015), esta particularidad podría causar confusión ya que se entendería que se requiere otro modelo matemático para realizar los análisis sísmico. Sin embargo, esto no implica ningún problema ya que el Software OpenSees toma en cuenta automáticamente esta particularidad.
- ✓ **Capacidades de desplazamiento ($d_2 = d_3$, $d_1 = d_4$):** Estos parámetros aún no son conocidos porque aún no se ha diseñado el aislador FPT, por lo que se debe optar por asumir estos valores. Los valores asumidos deben ser relativamente grandes de tal manera

que se garantice que el aislador pueda moverse libremente entre las fases I, II y III (rango de operación) sin llegar a las fases IV y V. En nuestro se asumen $d_2 = d_3 = 10in$ y $d_1 = d_4 = 50in$, dando una capacidad de desplazamiento total de aproximadamente 100in.

✓ **Parámetros de convergencia:**

Desplazamiento de fluencia (uy): Se recomienda tomar valores entre 0.25 mm y 1mm. Valores muy pequeños provocan problemas de convergencia (Dao, 2017).

Rigidez a compresión (kvc): Se determina como la rigidez axial que tiene un cilindro con diámetro D_R y altura igual a la altura total del aislador.

Rigidez a tensión(kvt): Se debe asignar un valor relativamente pequeño ya que los aisladores FPT no tiene resistencia a tensión.

Fuerza mínima a compresión (minFv): Para evitar fuerzas axiales negativas (en caso de existir uplift)

En la Tabla 6.5 se muestra un resumen con los valores de los parámetros a ingresar en OpenSees para los múltiples análisis sísmicos NLRHA. Se incluye la notación que se usa en OpenSees.

| Parámetro | Notación Constantinou ¹ | Notación OpenSees ² | Valor | Unidad |
|--|------------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------|
| Carga sobre el aislador | W | W | 1 | kip |
| Amortiguamiento viscoso lineal y no lineal | - | ζ | 0 | % |
| Desplazamiento de fluencia | - | uy | 0.039 | in |
| Rigidez a compresión del aislador | - | Kvc | 47566 | kip/in |
| Rigidez a tensión del aislador | - | kvt | 0.000006 | kip/in |
| Fuerza mínima a compresión | - | minFv | 0.00002 | kip |
| Capacidad de desplazamiento - superficies internas | $d_2 = d_3$ | d_1 | 10 | in |
| Capacidad de desplazamiento - superficies externas | $d_1 = d_4$ | $d_2 = d_3$ | 50 | in |
| Coefficiente de fricción - superficies internas | $\mu_2 = \mu_3$ | mu1 | 2 | % |
| Coefficiente de fricción - superficies externas | $\mu_1 = \mu_4$ | mu2 = mu3 | 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10 | % |
| Radio de curvatura efectivo - superficies internas | $R_{ef2} = R_{ef3}$ | L1 | 5.5 ; 12 ; 23 ; 33 | in |
| Radio de curvatura efectivo - superficies externas | $R_{ef1} = R_{ef4}$ | L2 = L3 | 83.5 ; 151.5 | in |
| ¹ (Fenz & Constantinou, 2008a) | | | | |
| ² (Dao et al., 2013) | | | | |

Tabla 6.5 Parámetros para ingresar en OpenSees (para $\mu_1 = \mu_4$)

Ejemplo de análisis en OpenSees

Dadas las siguientes propiedades:

| Parámetro | Notación Constantinou ¹ | Notación OpenSees ² | Valor | Unidad |
|--|------------------------------------|--------------------------------|-------|--------|
| Coeficiente de fricción - superficies internas | $\mu_2 = \mu_3$ | $\mu 1$ | 2 | % |
| Coeficiente de fricción - superficies externas | $\mu_1 = \mu_4$ | $\mu 2 = \mu 3$ | 5 | % |
| Radio de curvatura efectivo - superficies internas | $R_{ef2} = R_{ef3}$ | $L1$ | 23 | in |
| Radio de curvatura efectivo - superficies externas | $R_{ef1} = R_{ef4}$ | $L2 = L3$ | 83.5 | in |

Tabla 6.6 Ejemplo en OpenSees: Propiedades del FPT analizado

Para el sismo RSN175, se tiene tienen los siguientes resultados:

✓ Comportamiento histerético

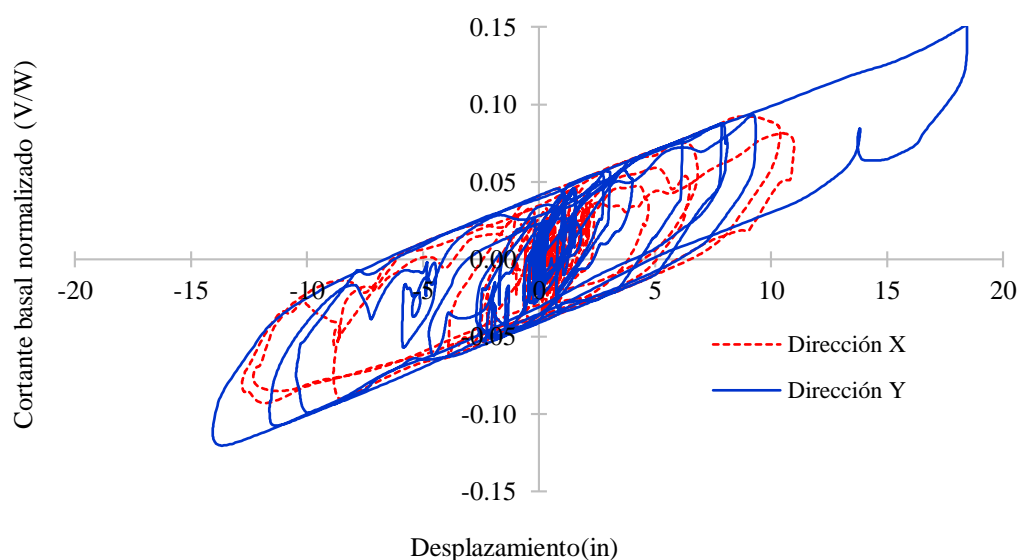


Figura 6.10 Ejemplo OpenSees: Curvas de histéresis - sismo RSN175

✓ Desplazamientos tiempo-historia

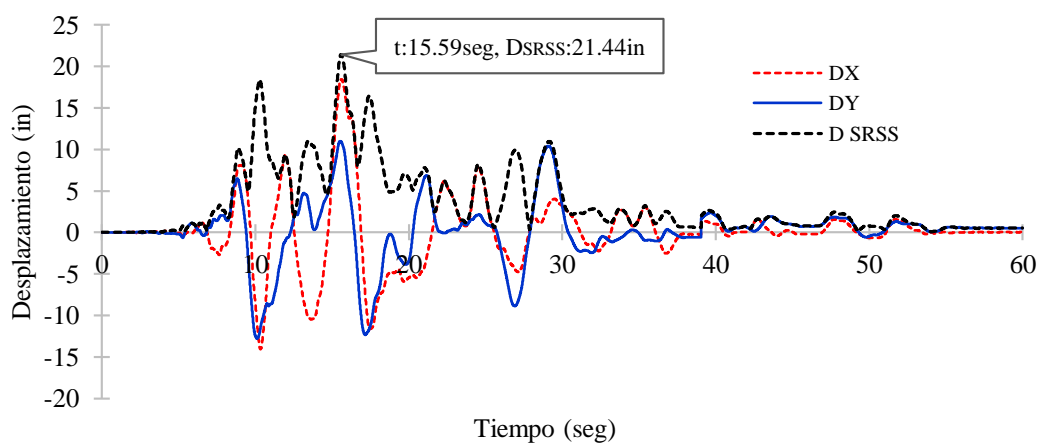


Figura 6.11 Ejemplo OpenSees: Desplazamientos tiempo-historia - sismo RSN175

✓ Orbital de desplazamiento horizontal

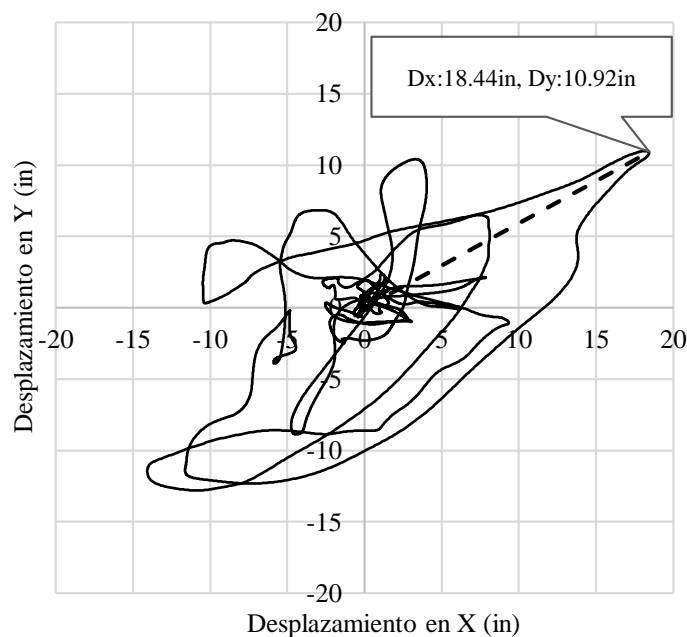


Figura 6.12 Ejemplo OpenSees: Orbital de desplazamiento - sismo RSN175

- ✓ El desplazamiento máximo para el sismo RSN175 se calcula con la ecuación 4.2, obteniéndose:

$$D_{SRSS_max(1)} = \sqrt{18.44^2 + 10.92^2} = 21.44 \text{ in (ver Figura 6.12)}$$

$$D_{SRSS_max(1)} \text{ ocurre en el instante } t = 15.59 \text{ seg. (ver Figura 6.11)}$$

Un cálculo similar se realiza para los 6 sismos restantes. Los resultados tabulados se muestran en la Tabla 6.7.

| SISMO – PEER # | $D_{SRSS_max(i)}$ (in) |
|-----------------|-------------------------|
| RSN175_IMPVALL | 21.44 |
| RSN1158_KOCAELI | 39.90 |
| RSN728_SUPER | 13.62 |
| RSN864 LANDERS | 24.14 |
| RSN187_IMPVALL | 20.76 |
| RSN549_CHALFANT | 19.51 |
| RSN458_MORGAN | 15.54 |

Tabla 6.7 Ejemplo en OpenSees: Desplazamientos máximos para cada uno de los siete sismos

El desplazamiento máximo (D_M) que se usa para diseño se calcula con la ecuación 4.1, que no es más que el promedio de los desplazamientos máximos de los siete sismos:

$$D_M = \frac{\sum_{i=1}^7 D_{SRSS_max(i)}}{7} \rightarrow D_M = 22.13 \text{ in}$$

El aislador analizado entra en la Fase III si se cumple que $D_M > u^{**}$, donde u^{**} se calcula con la ecuación 3.30, obteniéndose $u^{**} = 1.38 \text{ in}$. Por lo tanto, $D_M = 22.13 \text{ in} > u^{**} = 1.38 \text{ in}$, con lo que se comprueba que el aislador opera en la Fase III. De esta manera el cortante basal (V_M) puede ser calculado usando la ecuación 3.36, correspondiente a la Fase III.

Simplificando la ecuación 3.36 y reemplazando F por V_M , y u por D_M , se tiene:

$$V_M = \frac{W}{2R_{ef1}} D_M + \frac{2F_{f2}R_{ef2} + (F_{f1} + F_{f4})(R_{ef1} - R_{ef2})}{2R_{ef1}}$$

$$V_M = \frac{1}{2(83.5)} (22.13) + \frac{2(0.02)(23) + (0.05 + 0.05)(83.5 - 23)}{2(83.5)} = 0.174W$$

En resumen, el FPT analizado genera: $D_M = 22.13 \text{ in}$ y $V_M = 0.174 W$.

El mismo procedimiento del ejemplo anterior se repite para las 48 configuraciones de FPTs que se generan de la Tabla 6.5 (esto significa que el *ejemplo de análisis en OpenSees* realizado anteriormente se repite 48 veces). Los resultados tabulados para todas estas configuraciones se presentan en la Tabla b1 del ANEXO B, pero, gráficamente se presentan a continuación:

Resultados

Finalmente, en las Figuras 6.13, 6.14 y 6.15 se ilustran los resultados del análisis, en los cuales se relaciona las propiedades de los aisladores con los parámetros de respuesta. La Figura 6.13 muestra la variación del desplazamiento en función de los coeficientes de fricción, así mismo, en la Figura 6.14 se muestra la variación del cortante basal en función de los coeficientes de fricción, y en la Figura 6.15 se relaciona el desplazamiento y el cortante para cada aislador FPT.

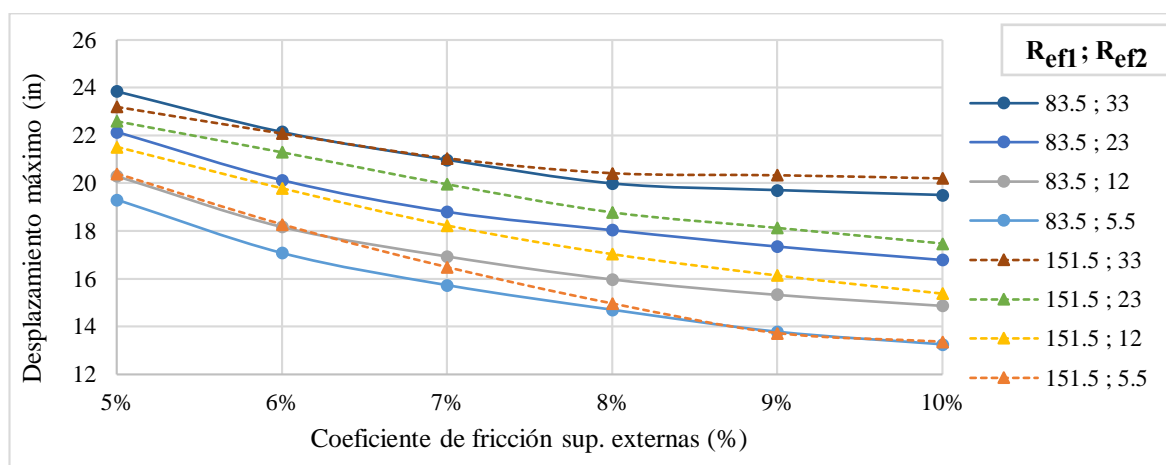


Figura 6.13 Desplazamiento máximo vs. fricción superficies externas

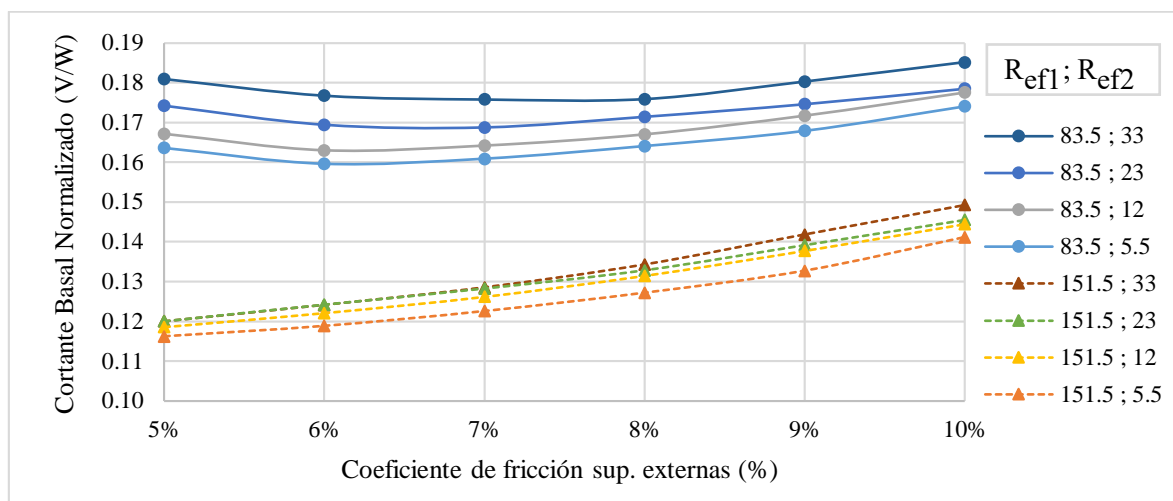


Figura 6.14 Cortante basal normalizado vs. fricción superficies externas

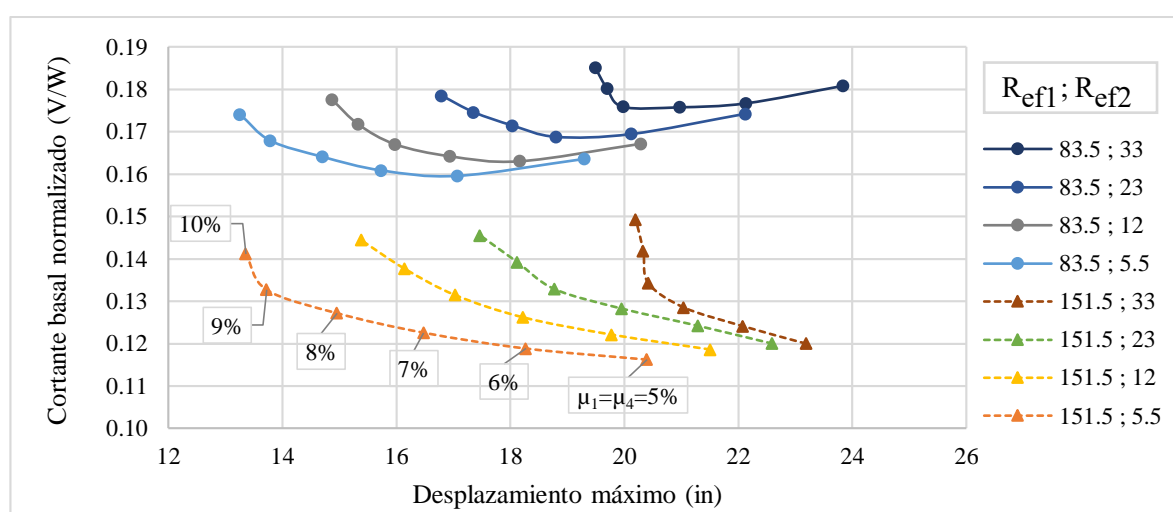


Figura 6.15 Cortante basal normalizado vs. desplazamiento máximo

La importancia de generar este tipo de gráficos se muestra en el siguiente paso, en el cual se selecciona las propiedades del aislador FPT para cumplir con los objetivos de diseño.

Paso 3: Selección propiedades

FPT con dos coeficientes de fricción

En base a las Figuras 6.13, 6.14 y 6.15, se eligen de manera sucesiva el radio efectivo de las superficies externas ($R_{ef1} = R_{ef4}$), el radio efectivo de las superficies internas ($R_{ef2} = R_{ef3}$) y el coeficiente de fricción que actúa en las superficies externas ($\mu_1 = \mu_4$), pero, tratando que las propiedades elegidas logren reducir el desplazamiento y el cortante basal. La selección de las propiedades se resume en la Tabla 6.8.

| Símbolo | Criterio | Propiedad elegida | Unidad | Conjunto de FPTs |
|---------------------|--|-------------------|--------|--|
| $R_{ef1} = R_{ef4}$ | Reducción del cortante basal (ver Figura 6.15 y 6.16) | 151.5 | in | FPTs con: $R_{ef1} = 151.5in$ |
| $R_{ef2} = R_{ef3}$ | Reducción del cortante basal (ver Figura 6.15 y 6.16) | 5.5 | in | FPTs con: $R_{ef1} = 151.5in$ $R_{ef2} = 5.5in$ |
| $\mu_1 = \mu_4$ | Reducción del desplazamiento (ver Figura 6.14 y 6.16) | 8 | % | FPTs con: $R_{ef1} = 151.5in$ $R_{ef2} = 5.5in$ $\mu_1 = 8\%$ |
| $\mu_2 = \mu_3$ | - | 2 | % | |

Tabla 6.8 Selección de propiedades del aislador FPT

Para reducir aún más el desplazamiento, se pudo elegir el coeficiente de fricción de 10%. Sin embargo, ya se explicó que valores muy altos de fricción reducen la capacidad de recentrado del aislador, además, previamente se explicó que los coeficientes de fricción de 9% y 10% son analizados únicamente para entender el efecto que producen en la respuesta.

El FPT elegido (con código FPT10 en la Tabla b1 del ANEXO B) produce un desplazamiento y cortante basal de $15.0in$ y $0.13W$, respectivamente. Estos valores se usan para calcular la capacidad de recentrado:

Capacidad de recentrado

La fuerza de restitución se calcula usando la ecuación (5.3) de las Sección 5.3, que es válida para aisladores FPT que operan en la tercera fase de movimiento (es decir, cuando $D_M > u^{**}$). Por lo tanto, se debe comprobar que el aislador FPT elegido opera en la Fase III.

Para evitar realizar esta comprobación en cada caso ($D_M > u^{**}$), se calcula el valor máximo del desplazamiento límite, u^{**}_{MAX} , que se puede dar en los 48 aisladores FPT analizados. De esta manera todos los aisladores que cumplan con $D_M > u^{**}_{MAX}$ estarán funcionando en la Fase III.

Calculo de u^{**}_{MAX} :

Ecuación (3.30):

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} + R_{ef3}), \text{ tal que: } u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{ef3}$$

Simplificando la ecuación (3.30) para $\mu_4 = \mu_1$ se tiene que $u^{**} = u^*$, y por lo tanto:

$$u^{**} = u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{ef3} = 2(\mu_1 - \mu_2)R_{ef2}$$

Al remplazar las propiedades máximas de la Tabla 6.5 (estos son: $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.02$ y $R_{ef2} = 33in$) en la ecuación anterior, se obtiene $u^{**}_{MAX} = u^{**} = u^* = 5.28in$. Esto significa que todos los aisladores que cumplan con $D_M > 5.28in$ estarán funcionando en la Fase III.

De cálculo se concluye que el FPT elegido opera en la Fase III, ya que $D_M = 15.0in > 5.28in$, por lo tanto es aplicable la ecuación (5.3),

- ✓ Rigidez post-fluencia (tercera fase de movimiento):

$$K_d = K_3 = \frac{1}{2(151.5)} = 0.003 \text{ W/in}$$

- ✓ Fuerza de restitución:

$$F_{res} = \frac{0.003W/in(15.0in)}{2} = 0.023W \geq 0.025W \text{ (no cumple)}$$

A primera vista, se podría decir que el aislador elegido cumple con la capacidad de recentrado ya que $0.023W$ y $0.025W$ son aproximadamente iguales, pero, se recuerda que se está trabajando con parámetros de fricción nominales, esto quiere decir que si consideramos la variabilidad de los coeficientes de fricción (Ver Sección 5.4) lo más probable es que la fuerza de restitución se reduzca aún más. En este caso, lo recomendable es elegir otro aislador que tenga una fuerza de restitución mucho mayor al mínimo requerido ($> 0.025W$).

Ante lo anterior se busca otro aislador con una mayor capacidad de recentrado, esto se puede realizar de 2 maneras (Ver las recomendaciones para elegir aisladores FPT que tengan buena capacidad de recentrado en el Paso 3 de las Sección 4.4.1):

1. Reduciendo el coeficiente de fricción: esto incrementa el desplazamiento (ver Figura 6.13) y en consecuencia el tamaño del aislador.
2. Incrementado la rigidez (reduciendo el radio de curvatura $R_{ef1} = R_{ef4}$): esto incrementa el cortante basal (ver Figura 6.14) y en consecuencia mayor fuerza cortante de diseño.

Las dos opciones son válidas, pero la primera opción es menos viable desde el punto de vista económico y constructivo, sabiendo que, a mayor tamaño del aislador, mayor es su costo y mayores son las dificultades constructivas (traslado, montaje, etc.). Por lo tanto, se opta por la segunda opción; pasando del radio de curvatura efectivo $R_{ef1} = 151.5in$ a $R_{ef1} = 83.5in$.

Por lo tanto, las propiedades del nuevo aislador son las siguientes:

| Símbolo | Valor | Unidad |
|---------------------|-------|--------|
| $R_{ef1} = R_{ef4}$ | 83.5 | in |
| $R_{ef2} = R_{ef3}$ | 5.5 | in |
| $\mu_1 = \mu_4$ | 8 | % |
| $\mu_2 = \mu_3$ | 2 | % |

Tabla 6.9 Propiedades del nuevo aislador FPT elegido (FPT con 2 fricciones)

El nuevo aislador FPT (con código FPT4 en la Tabla b1 del ANEXO B) tiene un desplazamiento y cortante basal de $14.7 in$ y $0.16W$, respectivamente. Este aislador tiene una fuerza de restitución de $0.044W > 0.025W$, que cumple con el valor mínimo requerido.

FPT con 3 coeficientes de fricción

Como se pudo observar, el aislador FPT elegido finalmente (mostrado en la Tabla 6.9) posee solo dos coeficientes de fricción, el cual no representa un diseño óptimo en términos de desempeño, ya que, con esta característica estaríamos diseñando un aislador de FPT que tendrá el comportamiento de un aislador de DFP (doble péndulo), con lo cual se estaría desaprovechando los beneficios del aislador de FPT.

En vista de lo anterior, se incorpora otro coeficiente de fricción en el aislador elegido. Para esto, se realiza nuevamente los análisis NLRHA en OpenSees (*paso 2*). Pero en este caso se mantienen constantes los radios de curvatura ($R_{ef1} = 83.5in$, $R_{ef2} = 5.5in$), y se hace variar únicamente los coeficientes de fricción de las superficies externas, tales que $\mu_1 < \mu_4$.

Los parámetros para OpenSees se muestra en la Tabla 6.10. Los otros parámetros requeridos en OpenSees se encuentran en la Tabla 6.5.

| Parámetro | Notación Constantinou | Notación OpenSees | Valor | Unidad |
|---|-----------------------|-------------------|------------------------|--------|
| Coeficiente de fricción - superficies internas | $\mu_2 = \mu_3$ | $\mu 1$ | 2 | % |
| Coeficiente de fricción - superficie externa inferior | μ_1 | $\mu 2$ | 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10 | % |
| Coeficiente de fricción - superficie externa superior | μ_4 | $\mu 3$ | 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10 | % |
| Radio de curvatura efectivo - superficies internas | $R_{ef2} = R_{ef3}$ | $L1$ | 5.5 | in |
| Radio de curvatura efectivo - superficies externas | $R_{ef1} = R_{ef4}$ | $L2 = L3$ | 83.5 | in |

Tabla 6.10 Parámetros para ingresar en OpenSees (para $\mu_1 < \mu_4$)

Los resultados tabulados se presentan en la Tabla b2 del ANEXO B, mientras que, el resultado ilustrativo se presenta en la Figura 6.16.

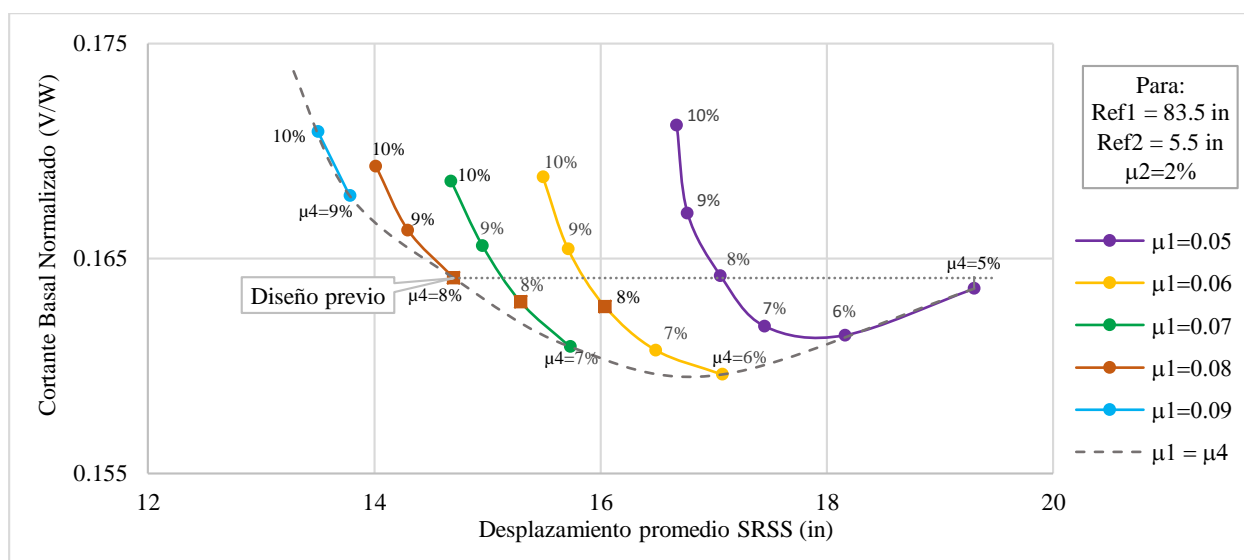


Figura 6.16 Cortante basal normalizado vs. desplazamiento máximo (para $\mu_1 < \mu_4$)

En la Figura 6.16, la curva entrecortada es para $\mu_1 = \mu_4$. De esta curva nacen otras curvas (resultado del presente análisis) que tienden a reducir el desplazamiento e incrementar el cortante basal (esto se da por el incremento del coeficiente de fricción efectivo, $\mu_{ef} = f(\mu_1, \mu_4)$). Esto nos abre la posibilidad de optimizar el diseño. Por ejemplo, si nuestras fricciones de diseño fueran $\mu_1 = \mu_4 = 6\%$ y por algún motivo se requiere reducir aún más el desplazamiento, entonces se podría elegir $\mu_1 = 6\%$ y $\mu_4 = 8\%$, sin haber alterado en gran medida el diseño.

Además, en la Figura 6.16, el punto marcado como “*Diseño previo*” corresponde a las propiedades del aislador FPT presentado en la Tabla 6.9 ($\mu_1 = \mu_4 = 0.08$).

Con el análisis realizado, no es posible reducir los desplazamientos. Sin embargo, para este ejemplo, se eligen coeficientes de fricción que proporcione aproximadamente el mismo cortante basal. Con este criterio se dan 2 posibilidades ($\mu_1 = 7\%$, $\mu_4 = 8\%$; %, $\mu_1 = 6\%$, $\mu_4 = 8\%$), pero finalmente se eligen $\mu_1 = 6\%$ y $\mu_4 = 8\%$. Con esto se espera mejorar el desempeño.

| Símbolo | Valor | Unidad |
|---------------------|-------|--------|
| $R_{ef1} = R_{ef4}$ | 83.5 | in |
| $R_{ef2} = R_{ef3}$ | 5.5 | in |
| μ_4 | 8 | % |
| μ_1 | 6 | % |
| $\mu_2 = \mu_3$ | 2 | % |

Tabla 6.11 Parámetros del aislador FPT elegido (con 3 fricciones)

Este aislador (con código FPT4 en la Tabla b2 del ANEXO B) tiene un desplazamiento y cortante basal de 16.0 in y 0.16W, respectivamente. Se calcula una fuerza de restitución de 0.048W > 0.025W.

Paso 4: Capacidad de desplazamiento

En resumen, de los pasos anteriores, se tiene:

| Propiedades geométricas | | Propiedades de fricción | |
|-------------------------|--------|-------------------------|----|
| $h_2 = h_3$ | 3.5in | $\mu_2 = \mu_3$ | 2% |
| $h_1 = h_4$ | 4.5in | μ_1 | 6% |
| $R_1 = R_4$ | 88.0in | μ_4 | 8% |
| $R_2 = R_3$ | 9.0in | | |
| $D_R = 8in$ | | | |

Que produce un desplazamiento y una fuerza cortante de:

$$D_M = 16.0 \text{ in y } V_M = 0.16W$$

Con esta información se calcula las capacidades de desplazamiento ($d_2 = d_3$ y $d_1 = d_4$) que debe tener el aislador FPT para permitir un desplazamiento igual a D_{TM} , donde $D_{TM} = 1.15D_M = 18.4 \text{ in}$ (ver Tabla 5.1, Sección 5.5.1). El cálculo se realiza en la Tabla 6.12.

| Parámetro | Ecuación | Resultado |
|--|--|--|
| Capacidad de desplazamiento placas internas ($d_2 = d_3$) | $d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2}$ $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{ef3}$ | $d_2 > 0.22\text{in}$ $d_3 > 0.33\text{in}$ $d_2 = 1.0\text{in}$ (asumido) |
| Capacidad de desplazamiento placas externas ($d_1 = d_4$) | <p>Método 1: $d_1 \geq \left[\frac{D_{TM} - 2(\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + (\mu_4 - \mu_1)(R_{ef1} - R_{ef2})}{2} \right] \frac{R_1}{R_{ef1}}$</p> <p>Método 2: $d_1 \geq \left(\frac{D_{TM}}{2} \right) \frac{R_1}{R_{ef1}}$</p> | $d_1 \geq 10.29\text{ in}$ $d_1 \geq 9.70\text{ in}$ $d_1 = 10.5\text{in}$ (asumido) |

Tabla 6.12 Cálculo de las capacidades de desplazamiento

Dimensión en planta

Con referencia a la Figura 4.8 (Paso 4, Sección 4.4.1),

- ✓ Diámetro de las placas internas 2 y 3 (D_S)

$$D_S = D_R + 2t_{r2} + d_2 + d_3$$

t_{r2} es el espesor del anillo retenedor de la placa 2. Se asume $t_{r2} = 0.5 \text{ in}$, con lo que se obtiene que :

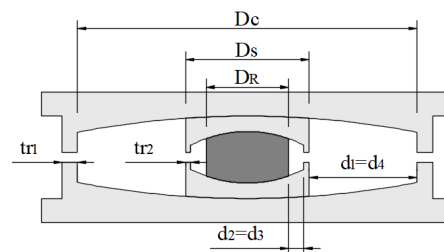
$$D_{\zeta} = 11.0 \text{ in}$$

- ✓ Diámetro de las superficies de las placas externas 1 y 4 (D_C)

$$D_C = D_S + d_1 + d_4$$

$$D_c = 32.0 \text{ in}$$

De la Tabla 4.2 se asume $D_C = 33.0$ in



Si usamos la nomenclatura de EPS (mostrada en la Sección 4.5), el aislador obtenido del diseño preliminar correspondería al FPT8833/11-9R/8-7.

6.3.4 Contactando con el fabricante

Hasta el momento se ha realizado el diseño preliminar del aislador FPT. Posterior a esto, es necesario contactarse con el fabricante de aisladores, a fin de verificar que el aislador FPT obtenido del diseño preliminar, se disponga en los catálogos de EPS (Earthquake Protection System).

Para este ejemplo, se considera que el aislador obtenido en el diseño preliminar (FPT8833/11-9R/8-7) efectivamente dispone EPS. Por lo tanto, este aislador se usará para los análisis sísmicos que se realizan en la Sección 6.5 y 6.6.

Por facilidad el aislador FPT8833/11-9R/8-7 obtenido del diseño preliminar, de aquí en adelante, se lo nombra como FPT8833.

6.4 Propiedades del aislador FPT8833

Las propiedades geométricas se muestran en la Figura 6.17.

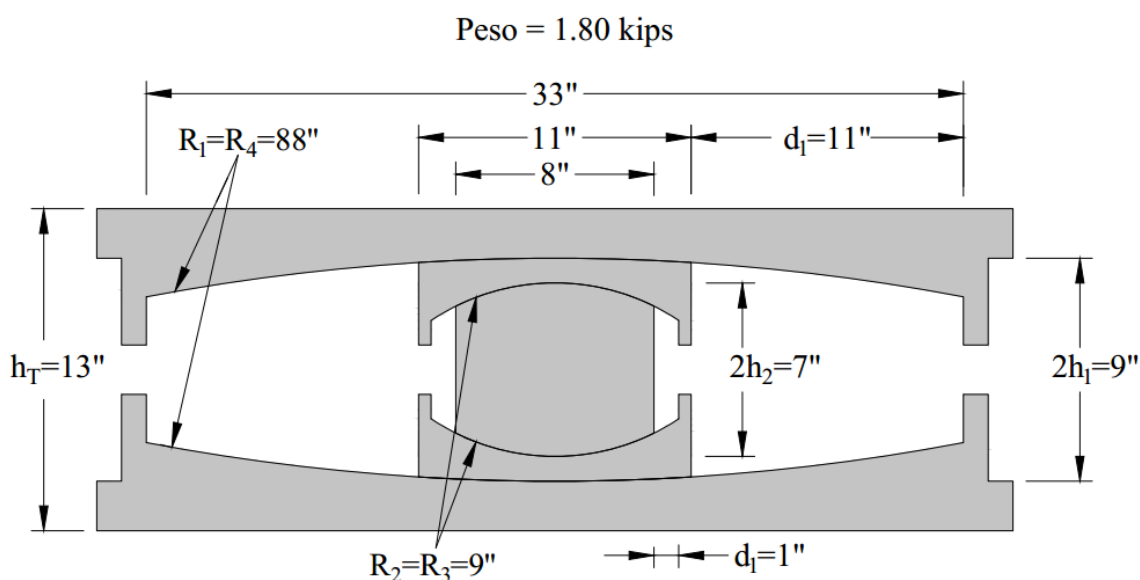


Figura 6.17 Geometría del aislador FPT8833

Y las propiedades mecánicas (coeficientes de fricción nominales) se presentan a continuación:

$$\begin{aligned}\mu_2 &= \mu_3 = 2\% \\ \mu_1 &= 6\% \\ \mu_4 &= 8\%\end{aligned}$$

6.4.2 Propiedades “Lower Bound” y “Upper Bound” del sistema de aislación.

Para realizar los análisis sísmicos, se requiere determinar las propiedades LB y UB del sistema de aislación, los cuales se determina aplicando los factores de modificación de propiedades (λ_{min} y λ_{max}) a los coeficientes de fricción nominales del aislador FPT. Estos factores se calculan usando las ecuaciones (C17.2-1) y (C17.2-2) que se presentaron en la Sección 5.4.

Para aplicar las ecuaciones (C17.2-1) y (C17.2-2), en primer lugar, se establecen los factores λ_{ac} , λ_{test} y λ_{spec} :

Factores por envejecimiento y contaminación (λ_{ac}):

λ_{ac} se calcula como el producto entre el factor por envejecimiento (λ_a) y el factor por contaminación (λ_c). El factor λ_a resulta principalmente por la corrosión de la superficie cóncavas y el factor λ_c se da por la presencia de partículas externas en las superficies cóncavas.

Para establecer λ_a y λ_c se siguen las recomendaciones dadas en (Constantinou, Whittaker, Kalpakidis, & Fenz, 2006; McVitty & Constantinou, 2015), de los que se obtiene:

Factor λ_a :

$$\lambda_{a,max} = 1.10 \text{ y } \lambda_{a,min} = 1.0$$

Factor λ_c :

$$\lambda_{c,max} = 1.05 \text{ y } \lambda_{c,min} = 1.0$$

$\lambda_{c,max}$ se calcula con la siguiente ecuación:

$$\lambda_{c,max} = (\lambda_{c,up} + \lambda_{c,down})/2$$

donde:

$\lambda_{c,up}$: es la contaminación en la superficie cóncava superior, y se toma igual a 1.0 (no existe acumulación de partículas).

$\lambda_{c,down}$ es la contaminación en la superficie cóncava inferior, y se toma igual a 1.10 (existe acumulación de partículas).

$$\lambda_{c,max} = (1.0 + 1.1)/2 = 1.05$$

El cálculo del factor λ_{ac} se resumen en la Tabla 6.13.

| Factor por | Símbolo | λ_{min} | λ_{max} | Referencia |
|--------------------------------|---|-----------------|-----------------|---|
| Envejecimiento | λ_a | 1.0 | 1.1 | (Constantinou et al., 2006; McVitty & Constantinou, 2015) |
| Contaminación | λ_c | 1.0 | 1.05 | |
| Envejecimiento y contaminación | $\lambda_{ac} = \lambda_a \times \lambda_c$ | 1.0 | 1.16 | |

Tabla 6.13 Factores por envejecimiento y contaminación

Factores por posibles variaciones en la fabricación (λ_{spec}) y en los ensayos (λ_{test}):

Para el ejemplo, estos factores se asumen directamente para ser iguales a los usados en el Manual SEAOC (2014), estos se presentan en la Tabla 6.14.

| Factor por posibles variaciones en: | Símbolo | λ_{min} | λ_{max} | Referencia |
|-------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| En la fabricación (tolerancias) | λ_{spec} | 0.95 | 1.05 | Manual SEAOC (2014) |
| En los ensayos | λ_{test} | 0.95 | 1.05 | Manual SEAOC (2014) |

Tabla 6.14 Factores por posibles variaciones en la fabricación y en los ensayos

Factores de modificación de propiedades (λ_{min} y λ_{max}):

Finalmente, aplicando las ecuaciones (C17.2-1) y (C17.2-2), se obtiene:

$$\lambda_{min} = 0.90 \text{ (Para fricciones Lower Bound)}$$

$$\lambda_{max} = 1.23 \text{ (Para fricciones Upper Bound)}$$

Los factores calculados ($\lambda_{min} = 0.90$ y $\lambda_{max} = 1.23$) se aplican a los tres coeficientes de fricción nominales del aislador FPT8833, esto se realiza considerando que todos están hechos del mismo material. El cálculo se presenta en la Tabla 6.15.

| Coeficiente de fricción | Símbolo | Lower Bound (LB) | Nominal | Upper Bound (UB) |
|---|-----------------|------------------|---------|------------------|
| Coef. de fricción - superficie internas | $\mu_2 = \mu_3$ | 1.8% | 2% | 2.5% |
| Coef. de fricción - superficie externa inferior | μ_1 | 5.4% | 6% | 7.4% |
| Coef. de fricción - superficie externa superior | μ_4 | 7.2% | 8% | 9.8% |

Tabla 6.15 Coeficientes de fricción LB y UB del aislador FPT8833

Nota: Otra forma de obtener los coeficientes de fricción LB y UB es por medio del fabricante. Además, esta forma de obtener los coeficientes de fricción LB y UB es más precisa, debido a que el fabricante sabe con certeza como varían las propiedades de sus materiales.

6.5 Resumen de las Secciones 6.3 y 6.4

En la Sección 6.3.3 se realizó el diseño preliminar del aislador FPT, cuyas propiedades se presentaron en el Paso 4. En la Sección 6.3.4 se debía verificar la disponibilidad de este tipo de aisladores con EPS, sin embargo, no se realizó la verificación y se asumió directamente que el aislador obtenido del diseño preliminar (FPT8833/11-9R/8-7) sí dispone EPS y por lo tanto es el usado para los análisis sísmicos. El aislador FPT8833/11-9R/8-7 se lo nombró como FPT8833.

En la Sección 6.4 se presentó el aislador FPT8833 con sus propiedades nominales (geométricas y friccionales), y a continuación se determinó las propiedades Lower Bound y Upper Bound de los

aisladores FPT8833 aplicando los factores de modificación de propiedades a los coeficientes de fricción nominales.

Una vez conocida la geometría y las propiedades friccionales Lower Bound y Upper Bound del aislador, el siguiente paso es realizar los análisis sísmicos para comprobar que el aislador FPT8833 (que se supone se obtuvo de los catálogos de EPS) puede ser usado para aislar el edificio de acero de 6 pisos presentado al inicio de este Capítulo. Con los análisis sísmicos se obtienen los desplazamientos, cortantes y fuerzas axiales que se producen en el sistema de aislación y/o aisladores, los cuales sirven para realizar verificaciones, tales como capacidad de desplazamiento y de restitución. La verificación por capacidad a fuerza cortante y a carga axial no son posibles para el presente ejemplo debido a que estas capacidades, para nuestro caso, son desconocidas (estas capacidades se determinan por medio de los ensayos y son proporcionadas por el EPS).

El análisis sísmico con el método estático ELF se realiza en esta Sección 6.6 y el método dinámico NLRHA se realiza en la Sección 6.7.

6.6 Análisis de fuerza lateral equivalente (ELF)

El análisis sísmico con el método de fuerza lateral equivalente es un proceso iterativo, el cual consiste en asumir un desplazamiento ($D_{M_{inicial}}$), y con esto se calculan todas las propiedades del sistema de aislación ($V_M, K_M, T_M, \beta_M, B_M$). Con las propiedades del sistema de aislación, se recalcula el desplazamiento ($D_{M_{final}}$). El proceso finaliza cuando $D_{M_{final}} \approx D_{M_{inicial}}$.

Para aplicar el método, se debe seguir la secuencia de cálculos que se presentan a continuación:

| | Parámetro a calcular | Forma de cálculo |
|---|---|--|
| 1 | Asumir: $D_{M_{inicial}}$ | $D_{M_{inicial}}$ o de partida puede ser asumido igual al D_M determinado en el diseño preliminar. |
| 2 | Determinar si D_M se encuentra en la 3era, 4ta o 5ta fase de movimiento | Para esto se deben calcular los límites u_{dr1} y u_{dr4} , con las ecuaciones (3.37) y (3.42). |
| 3 | Calcular el cortante basal V_M | Aplicar la ecuación (3.36), (3.41) o (3.45) en el caso que D_M se encuentre en la 3era, 4ta o 5ta fase de movimiento, respectivamente. |
| 4 | Rigidez efectiva K_M | Ecuación (C17.2-3), Tabla 5.1, Sección 5.5.1 |
| 5 | Periodo efectivo T_M | Ecuación (C17.5-2), Tabla 5.1, Sección 5.5.1 |
| 6 | Amortiguamiento efectivo β_M | Ecuación (C17.2-4), Tabla 5.1, Sección 5.5.1 |
| 7 | Factor de amortiguamiento B_M | Ecuación AASHTO, Tabla 5.1, Sección 5.5.1 |
| 8 | Recalcular $D_{M_{final}}$ | Ecuación (C17.5-1), Tabla 5.1, Sección 5.5.1 |
| 9 | Criterio de aceptación | Si: $(D_{M_{final}} - D_{M_{inicial}}) < \text{tolerancia}$ |

Tabla 6.16 Secuencia de cálculos para realizar el análisis sísmico ELF

6.6.2 Información para realizar el análisis

Parámetros geométricos del aislador FPT8833

$$R_{ef2} = R_{ef3} = 5.5 \text{ in}$$

$$R_{ef1} = R_{ef4} = 83.5 \text{ in}$$

$$d_2^* = d_3^* = 0.6 \text{ in}$$

$$d_1^* = d_4^* = 10.4 \text{ in}$$

donde:

$d_i^* = d_i \frac{R_{efi}}{R_i}$ (para $i=1,2,3,4$): es la capacidad de desplazamiento real de cada superficie cóncava.

d_i debe ser remplazado por d_i^* en la ecuaciones de la Sección 3.4.

Parámetros de fricción del aislador FPT8833

Lower Bound (LB) Upper Bound (UB)

$$\mu_2 = \mu_3 = 1.8\% \quad \mu_2 = \mu_3 = 2.5\%$$

$$\mu_1 = 5.4\% \quad \mu_1 = 7.4\%$$

$$\mu_4 = 7.2\% \quad \mu_4 = 9.8\%$$

Información del proyecto

$$W = 10028 \text{ kips}$$

$$W_s = 8227 \text{ kips}$$

$$g = 386.4 \text{ in/s}^2$$

$$S_{M1} = 0.9 g$$

6.6.3 Iteraciones

Para propiedades de fricción LB

Siguiendo el procedimiento de la Tabla 6.16, se tiene:

1. Asumir D_M

$$D_M = 16.0 \text{ in (igual al } D_M \text{ del análisis preliminar)}$$

2. Determinar el punto de operación de D_M

La Figura 6.18 muestra la curva monotónica y la curva de histéresis generada para el desplazamiento $D_M = 16.0 \text{ in}$.

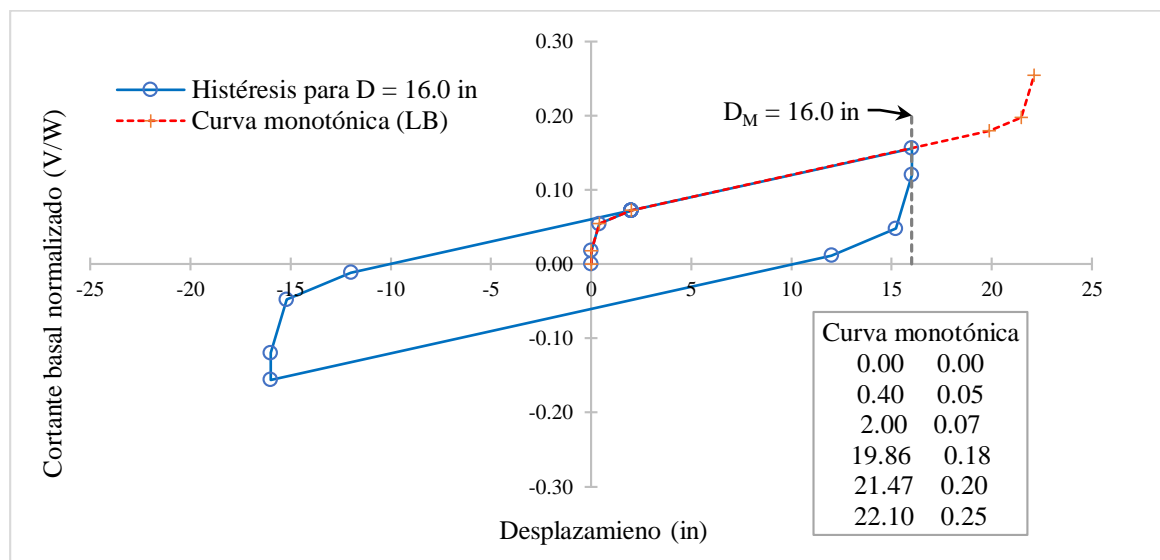


Figura 6.18 Curva monótonica y de histéresis (en $D_M = 16.0in$) del aislador FPT8833 para propiedades LB

De la Figura 6.18, los límites u^{**} y u_{dr4} son $2.00in$ y $19.86in$, respectivamente, con los que se comprueba que $D_M = 16.0in$ se encuentra en la tercera fase de movimiento.

3. Cortante V_M

Se comprobó que D_M se encuentra en la tercera fase, por lo tanto V_M se calcula con la ecuación (3.36), obteniéndose:

$$V_M = 0.156W$$

4. Rigidez efectiva K_M

$$K_M = V_M/D_M = 0.00975 W/in$$

5. Periodo efectivo T_M

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_M g}} = 3.24 in$$

6. Amortiguamiento efectivo β_M

$$\beta_M = \frac{E_M}{2\pi K_M D_M^2} = 0.24$$

$E_M = 3.72 \text{ W.in}$ (Energía disipada en un ciclo de histéresis (área de la curva de histéresis de la Figura 6.18))

7. Factor de amortiguamiento B_M

Usando la ecuación de ASHTO, se tiene:

$$B_M = \left(\frac{\beta_M}{0.05} \right)^{0.3} = 1.60$$

8. Desplazamiento máximo D_M

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} = 17.88 \text{ in}$$

9. Criterio de aceptación

$$17.88 \text{ in} - 16.0 \text{ in} = 1.88 \text{ in} < 0.01 \text{ in} \rightarrow \text{NO CUMPLE}$$

Para $D_M = 16.0 \text{ in}$, no se cumple con el criterio de aceptación, por lo tanto, se realiza una nueva iteración.

Finalmente, se encontró que para $D_M = 19.04 \text{ in}$, el análisis converge (D_M aún en la Fase III). Las propiedades correspondientes a este desplazamiento son 0.174 W , 0.00915 W/in , 3.34 seg , 0.21 y 1.55 para V_M , K_M , T_M , β_M , B_M , respectivamente.

Para propiedades de fricción UB

Se realiza un procedimiento similar al realizado para las propiedades LB.

Resultados

Los resultados de realizar el método de análisis ELF para las propiedades LB y UB, se resumen en la Tabla 6.17 y las correspondientes curvas de histéresis se presentan en la Figura 6.19

| Parámetro | Símbolo | MCE ($S_{M1}=0.9g$) | | Unidad |
|---------------------------------|-----------|-----------------------|-------------|--------|
| | | Lower Bound | Upper Bound | |
| Rigidez efectiva | K_M | 0.00915 | 0.0112 | W/in |
| Periodo efectivo | T_M | 3.34 | 3.03 | Seg |
| Desplazamiento máximo | D_M | 19.04 | 15.89 | in |
| Cortante basal | V_M | 0.174 | 0.177 | W |
| Amortiguamiento | β_M | 21 | 28 | % |
| Coefficiente de amortiguamiento | B_M | 1.55 | 1.68 | - |

Tabla 6.17 Resultados de aplicar el método de análisis ELF, para propiedades LB y UB

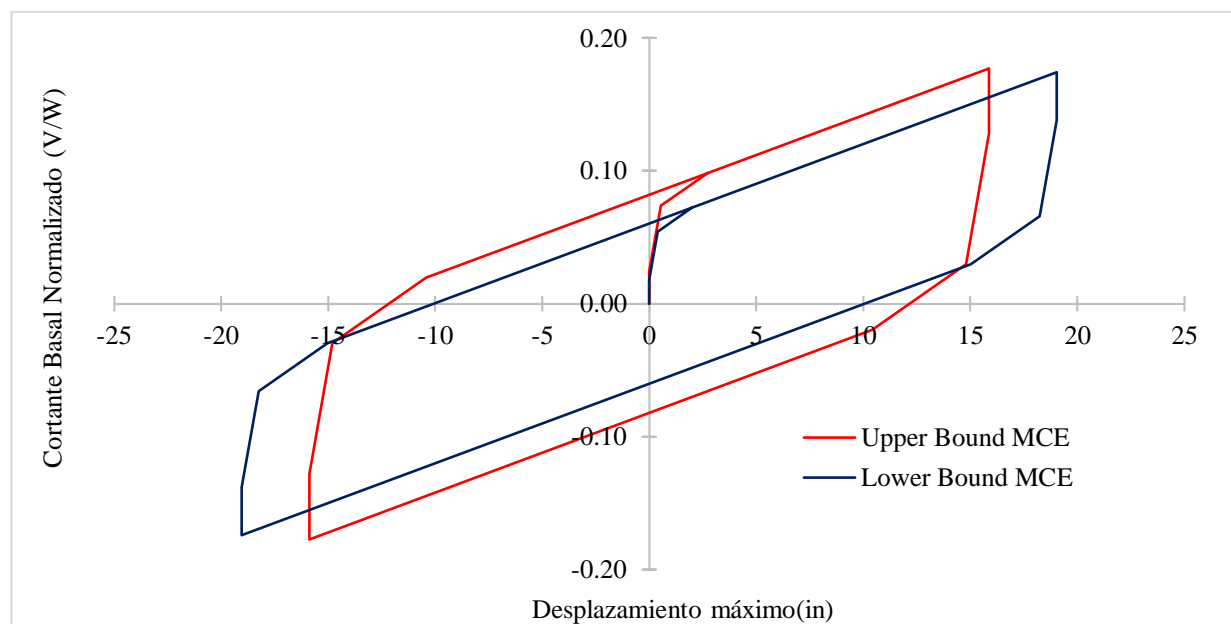


Figura 6.19 Curvas de histéresis generadas al aplicar el método de análisis ELF, para propiedades LB y UB

Usando los resultados presentados en la Tabla 6.17 se determinan los desplazamientos y cortantes de diseño, tal como sigue:

6.6.4 Desplazamientos y cortantes basales de diseño

Los siguientes desplazamientos y cortantes basales se usan para controlar los resultados del análisis dinámico NLRHA que se realiza más adelante.

Desplazamientos

De la Tabla 6.17, se tiene que el desplazamiento más crítico corresponde a las propiedades LB del sistema de aislación, por lo tanto, se tiene:

- ✓ Desplazamiento máximo (D_M)

$$D_M = 19.04 \text{ in}$$

- ✓ Desplazamiento total máximo (D_{TM})

$$D_{TM} = 1.15 \times 19.04 = 21.90 \text{ in}$$

Cortantes basales

Los cortantes basales para el diseño del sistema de aislación (y los elementos estructurales que se encuentran bajo el nivel de base) así como para el diseño de la superestructura, se usan las ecuaciones de la Tabla 5.3 que se encuentra en la Sección 5.5.1.

El cálculo de estos cortantes basales se realiza en la siguiente Tabla:

| Cortante basal | Ecuación | Propiedades LB | Propiedades UB |
|--|--|-----------------------|-------------------------------------|
| Para el sistema de aislación y los elementos estructurales bajo el nivel de base (V_b) | $V_b = K_M D_M$ | 1747 kips (0.174W) | 1777 kips (0.177W) |
| Para elementos estructurales que están sobre el nivel de base (superestructura) (V_s) | $V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{1-2.5\beta_M}$ | 1593 kips (0.159W) | 1675 kips (0.167W) |
| | $V_s = \frac{V_{st}}{R_I}$ | 797 kips (0.079W) | 838 kips (0.084W) |
| -Los cortantes basales normalizados han sido multiplicados por la carga sísmica $W=10028$ kips. -El factor de reducción de respuesta R_I , para la superestructura se calcula usando $R_I = 3/8R$. Para el edificio analizado $R = 6$, por lo tanto, se tiene que $R_I = 2$. | | | |

Tabla 6.18 Cortantes basales ELF para diseño

Límites de V_s , para diseño de la superestructura

El cortante basal V_s , no puede ser menor que los límites de la Tabla 5.4 de la Sección 5.5.1. El cálculo detallado de estos límites se presenta en el Anexo C.1, mientras que, el resumen de estos límites se presenta en la Tabla 6.19.

| Requerimiento, Sección 17.5.4.3 del ASCE7-16 | Valor |
|---|---|
| 1. La fuerza lateral requerida por la Sección 12.8 para una estructura empotrada asociada con un carga sísmica, W_s , y un periodo igual al periodo aislado, T_{M_UB} . | $V_s = 411 \text{ kips}$ |
| 3. La fuerza lateral V_{st} , calculado usando la Ecuación (C17.5.7) con V_b igual a la fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislación, usando las propiedades más altas de Upper Bound | $V_s = 926 \text{ kips}$ |
| 3a. 1.5 veces las propiedades nominales para el nivel de fluencia. | $V_s = 1203 \text{ kips}$ |
| 3d. La fuerza en el desplazamiento cero de un sistema deslizante después de un ciclo dinámico completo de movimiento en D_M . | $V_s = 816 \text{ kips}$ |

Tabla 6.19 Límites del cortante basal (V_s) para diseño de la superestructura

Finalmente, de las Tablas 6.18 y 6.19 se concluye que los cortantes basales para diseño deben ser de 1777 kips y 1203 kips correspondientes a los cortantes V_b y V_s , respectivamente.

6.7 Análisis no lineal tiempo historia (NLRHA)

El análisis no lineal tiempo historia se realiza usando el software Etabs 16.2.1. Se realizan 2 modelos de análisis, el uno para propiedades LB y el otro para propiedades UB. Los aisladores FPT8833 se modelan usando el elemento Link “Triple Friction Isolator”.

6.7.1 Acerca de Etabs

Modelos matemáticos para representar el comportamiento del aislador FPT

Para realizar el análisis sísmico NLRHA se requiere de un modelo matemático que represente el comportamiento histerético del aislador. Si el modelo matemático es capaz de aproximar de mejor manera el comportamiento histerético real del aislador, entonces los resultados son más precisos, aunque esto viene acompañado del consumo de una mayor cantidad de recursos en el equipo computacional.

Un modelo matemático usado con frecuencia, aunque no desarrollado específicamente para el aislador FPT, es el modelo bilineal, el cual es solo una aproximación al comportamiento histerético multi-fases del aislador FPT. En Etabs, este modelo se representa usando el elemento Link “*Friction Isolator*”. El detalle de como determinar los parámetros del modelo histerético bilineal se pueden encontrar en (Delgado, Aguiar, & Caiza, 2017; SEAOC, 2014).

Existen dos modelos que han sido desarrollados específicamente para el aislador FPT, estos se denominan como *modelo en paralelo* y *modelo en serie*.

El modelo en paralelo se usa para el caso particular en donde: $R_{ef1} = R_{ef4}$, $R_{ef2} = R_{ef3}$, $d_1 = d_4$, $d_2 = d_3$, $\mu_2 = \mu_3$ y $\mu_1 = \mu_4$. Esta condición simplifica el comportamiento a 3 fases de movimiento. Sin embargo, el modelo solo permite representar las dos primeras fases (Constantinou et al., 2011).

Por otro lado, el modelo en serie, sí, permite representar el comportamiento multi-fases del aislador FPT (descrito en Sección 3.4). Con este modelo se puede representar el comportamiento real del aislador FPT. Sin embargo, el modelo trae la desventaja de provocar el consumo de una gran cantidad de recursos en el análisis sísmico, aunque esto se vuelve irrelevante si tenemos en cuenta la importancia de predecir el comportamiento real de la estructura analizada. Otra ventaja del modelo en serie es que programas como Etabs y Sap2000 ya tienen incorporado este modelo matemático, y de esta manera se facilita el análisis de una estructura con aisladores FPT.

Modelo en serie

El modelo en serie (Figura 6.20) se encuentra detallado en (Fenz & Constantinou, 2008d). Este modelo consiste en conectar, en serie, 3 aisladores SFP (ver Sección 3.2). En donde, cada aislador SFP queda definido por sus 3 propiedades, a saber, radio de curvatura, coeficiente de fricción y capacidad de desplazamiento representado por un elemento tipo Gap. El elemento Gap funciona como anillo de retención de las superficies cóncavas.

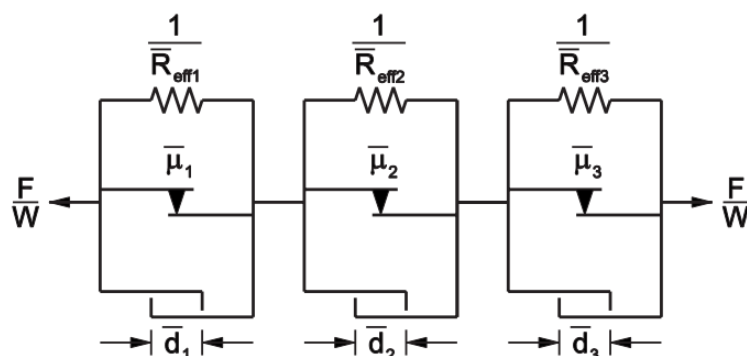


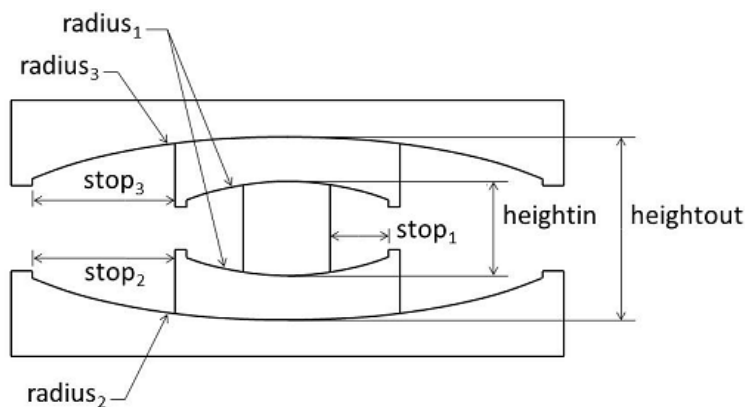
Figura 6.20 Modelo en serie para representar el comportamiento del aislador FPT (Fenz & Constantinou, 2008d)

Para modelar el comportamiento del aislador FPT usando el modelo en serie, Etabs dispone del elemento link “Triple Pendulum Isolator(TPI)” (CSI, 2016).

Nomenclatura y propiedades del elemento link “TPI” para modelar el FPT en Etabs

Nomenclatura:

La nomenclatura es similar al usado en OpenSees, esto se muestra a continuación:



donde:

$$\text{radius}_1 = R_2 = R_3$$

$$\text{radius}_2 = R_1$$

$$\text{radius}_3 = R_4$$

$$\text{Stop}_1 = d_2^* = d_3^*$$

$$\text{Stop}_2 = d_1^*$$

$$\text{Stop}_3 = d_4^*$$

$$\text{heightin} = h_2 + h_3$$

$$\text{heightout} = h_1 + h_4$$

Figura 6.21 Nomenclatura del aislador FPT en ETABS (Computers and Structures, 2016)

Propiedades:

- Stiff:** Rigidez horizontal antes de iniciar el deslizamiento (rigidez de fluencia). Para cada superficie, se calcula de la siguiente manera:

Superficies internas

$$Stiff_{inner} = \frac{\mu_1 W}{u_y}$$

Superficie externa inferior

$$Stiff_{outer_b} = \frac{(\mu_2 - \mu_1)W}{u_y}$$

Superficie externa superior

$$Stiff_{outer_t} = \frac{(\mu_3 - \mu_1)W}{u_y}$$

donde:

u_y : desplazamiento de fluencia (se recomienda usar 0.04 in)

W : Carga reactiva promedio sobre el aislador

- b) **Friction coefficient fast:** Es el coeficiente de fricción a la máxima velocidad. El valor puede ser tomado directamente.
- c) **Friction coefficient slow:** Es el coeficiente de fricción a velocidad cero. El valor puede ser calculado como los 2/3 la fricción a la máxima velocidad.
- d) **Rate parameter (a):** Constante de velocidad de transición entre la fricción baja y fricción alta. Se toma como 1.27 seg/in para aisladores FPT.

6.7.2 Calculo de propiedades del elemento link “TPI” para modelar el FPT en Etabs

Propiedades generales (igual para LB y UB)

- ✓ Peso del aislador (W_I) = 1.8 kips (ver Figura 6.17)
- ✓ Masa del aislador (m) = $W_I/g = 0.0047 \text{ kip} \cdot \frac{\text{seg}^2}{\text{in}}$
- ✓ Inercia rotacional ejes horizontales (dirección 2 y dirección 3)

$$I_x = I_y = \frac{mr^2}{4} = 0.317 \text{ kip} \cdot \text{in} \cdot \text{seg}^2$$

$r \approx 16.5 \text{ in}$ (radio del aislador)

- ✓ Inercia rotacional eje vertical (dirección 1)

$$I_z = \frac{mr^2}{2} = 0.634 \text{ kip} \cdot \text{in} \cdot \text{seg}^2$$

Para determinar la inercia rotacional se ha considerado que el aislador es un disco rígido de diámetro D_C

En la Figura 6.22 se muestra el ingreso de estas propiedades en Etabs

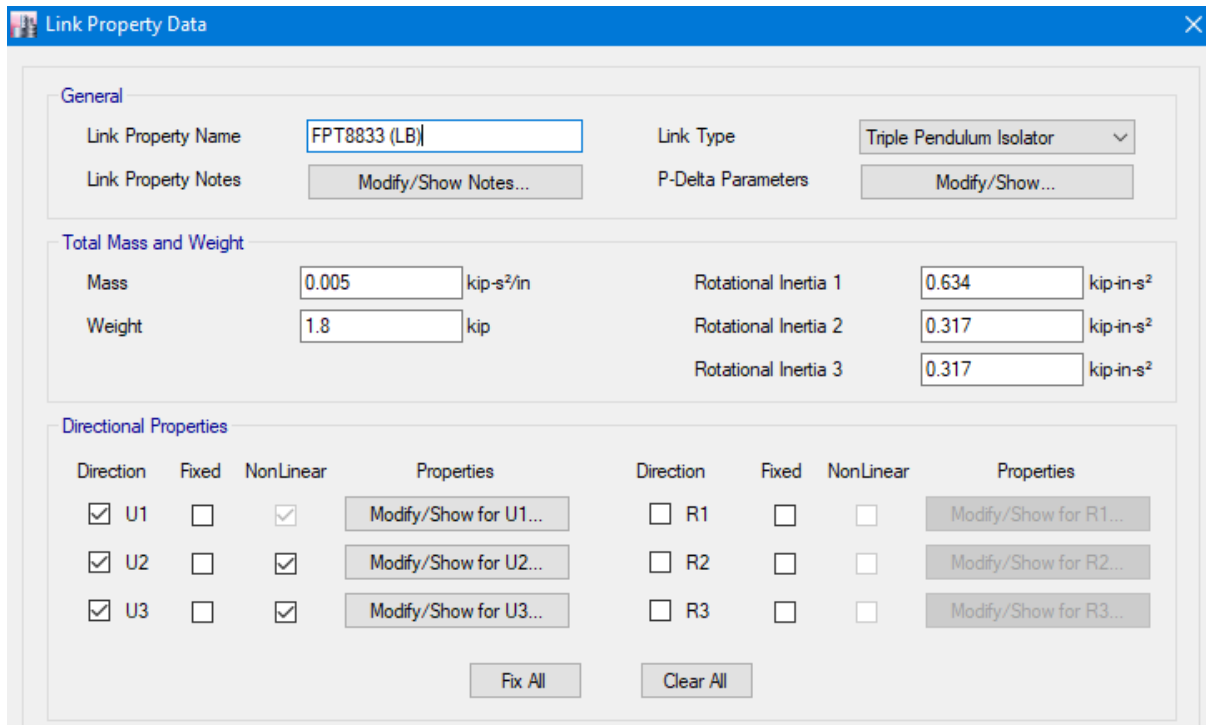


Figura 6.22 Ingreso de propiedades generales del elemento Link “TPI” en Etabs

Propiedades en la dirección U1 (Z)

Rigidez vertical (K_V): Se calcula asumiendo que el aislador es un cilindro con diámetro igual a D_R y con altura igual a h_T . De la Figura 6.17 se tiene que es $D_R = 8 \text{ in}$ y $h_T = 13 \text{ in}$, por lo tanto:

$$K_V = \frac{EA_R}{h_T} = \frac{(14500 \times 50.27)}{13} = 56070 \text{ kip/in}$$

donde:

E: Es el módulo de elasticidad del acero ($E=29000 \text{ kip/in}$). Pero se usa $E/2$ para considerar mayor deformabilidad en el aislador.

A_R: Es el área de la sección transversal del cilindro de diámetro D_R .

Aunque se calcula un rigidez de $K_V = 56070 \text{ kip/in}$, al final se optó por usar una rigidez $K_V = 7000 \text{ kip/in}$ debido a problemas de convergencia.

La Figura 6.23 muestra el ingreso de la rigidez en Etabs. Debe notarse que esta rigidez es la misma para las propiedades lineales y no-lineales. La rigidez lineal se ingresa para realizar el análisis de cargas gravitacionales.

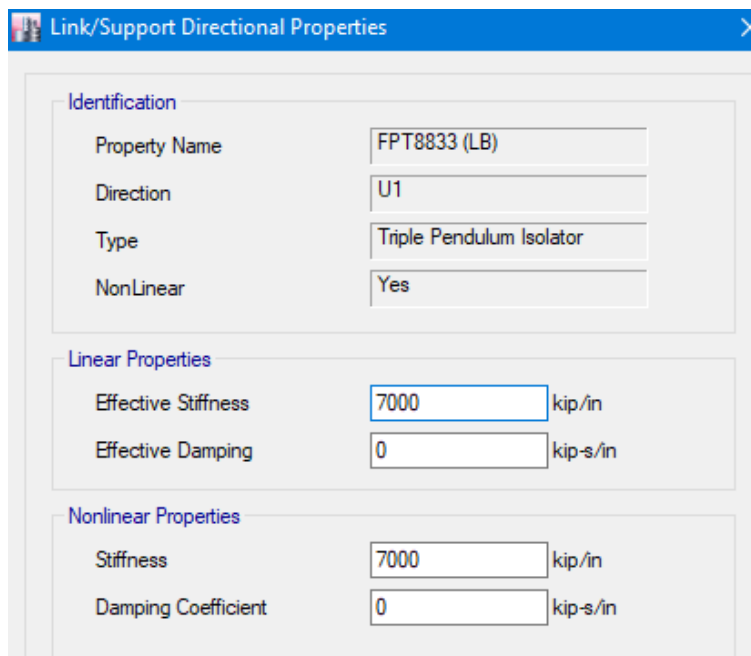


Figura 6.23 Ingreso de propiedades en la dirección U1 del elemento Link “TPI”, en Etabs

Propiedades en la dirección U2 y U3 (X, Y)

Las propiedades que se deben ingresar se muestran en la Tabla 6.20 para Lower Bound y en la Tabla 6.21 para Upper Bound. En ambas Tablas los términos “*Outer_top*”, “*Outer_botton*” e “*Inner_top = Inner_botton*” pertenecen a las propiedades de la placa 4, placa 1 y placa 2 (igual a la placa 3), respectivamente. Las cuatro primeras propiedades se calculan usando la ecuaciones y recomendaciones que se dieron al inicio de esta Sección. La quinta propiedad corresponde directamente al radio de curvatura (R_i) y la última propiedad “*Stop Distance*” es igual a la capacidad de desplazamiento real (d_i^*).

Debe notarse que no se ha colocado la capacidad de desplazamiento real en las dos placas externas, sino que ha establecido una capacidad mayor e igual a 20 in. Esto se realiza para asegurar que el deslizamiento permanezca en la tercera fase, de esta manera se evita la reducción del desplazamiento en alguno de los sismos como consecuencia de la rigidización del sistema de aislación al ingresar en la cuarta o quinta fase de movimiento.

| Parameter | Outer_top | Outer_botton | Inner_top = Inner_botton | Units |
|---------------------------|-----------|--------------|--------------------------|--------|
| Stiffness | 431.02 | 287.35 | 143.67 | kip/in |
| μ_{Slow} | 4.8 | 3.6 | 1.2 | % |
| μ_{Fast} | 7.2 | 5.4 | 1.8 | % |
| Rate Parameter | 1.27 | 1.27 | 1.27 | seg/in |
| Radius of Sliding Surface | 88 | 88 | 9 | in |
| Stop Distance | 20 | 20 | 0.61 | in |

Tabla 6.20 Propiedades LB en las direcciones U2 y U3 del elemento Link “TPI”, en Etabs

| Parameter | Outer_top | Outer_bottom | Inner_top = Inner_bottom | Units |
|---------------------------|-----------|--------------|--------------------------|--------|
| Stiffness | 587.75 | 391.83 | 195.92 | kip/in |
| μ_{Slow} | 6.6 | 4.9 | 1.6 | % |
| μ_{Fast} | 9.8 | 7.4 | 2.5 | % |
| Rate Parameter | 1.27 | 1.27 | 1.27 | seg/in |
| Radius of Sliding Surface | 88 | 88 | 9 | in |
| Stop Distance | 20 | 20 | 0.61 | in |

Tabla 6.21 Propiedades UB en las direcciones U2 y U3 del elemento Link “TPI”, en Etabs

A continuación, el ingreso de propiedades en Etabs:

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: FPT8833 (LB)
Type: Triple Pendulum Isolator
Direction: U2; U3
NonLinear: Yes

Linear Properties

Effective Stiffness - U2: 0 kip/in
Effective Stiffness - U3: 0 kip/in
Effective Damping - U2: 0 kip-s/in
Effective Damping - U3: 0 kip-s/in

Shear Deformation Location

Distance from End-J - U2: 6 in
Distance from End-J - U3: 6 in

Height and Symmetry of Sliding Surfaces

Height for Outer Surfaces: 6 in
Height for Inner Surfaces: 7 in
Outer Bottom Surface is Symmetric to Outer Top Surface: ☐
Inner Bottom Surface is Symmetric to Inner Top Surface: ☒

Nonlinear Properties for Directions U2 and U3

| | Outer Top | Outer Bottom | Inner Top | Inner Bottom | |
|----------------------------|-----------|--------------|-----------|--------------|--------|
| Stiffness | 431.02 | 287.35 | 143.67 | 143.67 | kip/in |
| Friction Coefficient, Slow | 0.048 | 0.036 | 0.012 | 0.012 | |
| Friction Coefficient, Fast | 0.072 | 0.054 | 0.018 | 0.018 | |
| Rate Parameter | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | sec/in |
| Radius of Sliding Surface | 88 | 88 | 9 | 9 | in |
| Stop Distance | 50 | 50 | 5 | 5 | in |

Figura 6.24 Ingreso de propiedades en la dirección U2 y U3 del elemento Link “TPI”, en Etabs

6.7.3 Consideraciones para el análisis en Etabs

- ✓ La estructura se modela para tener un comportamiento elástico, concentrando la no linealidad únicamente en los aisladores.
- ✓ El método de análisis elegido corresponde a *Nonlinear Direct Integration*, al cual se asignó un amortiguamiento Rayleigh de 0.15% para periodos de 0.1 a 5.0 segundos.
- ✓ Lo sismos escalados se aplican simultáneamente en las 2 direcciones ortogonales X, Y.

6.7.4 Comprobaciones de modelación en Etabs

Curva monotónica

Para comprobar que las propiedades ingresadas en el elemento Link “*TPP*” sean los correctos, se aplica una carga incremental al modelo en Etabs y se verifica que la curva monotónica generada sea igual a la curva monotónica determinada con el método ELF. Para efectos comparativos, en el modelo en Etabs, se coloca el mismo coeficiente de fricción para velocidad lenta y rápida (es decir, $\mu_{Slow} = \mu_{Fast}$).

En la Figura 6.25 se presenta la comparación, para las propiedades LB.

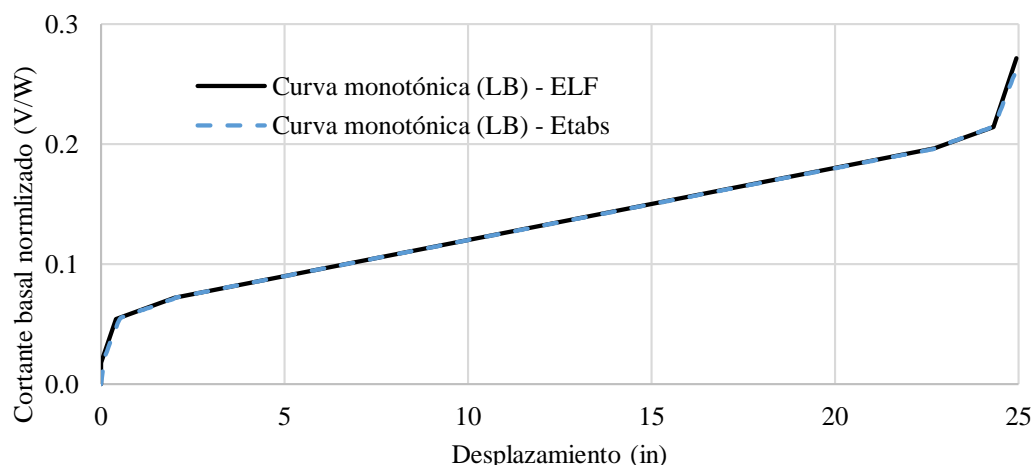
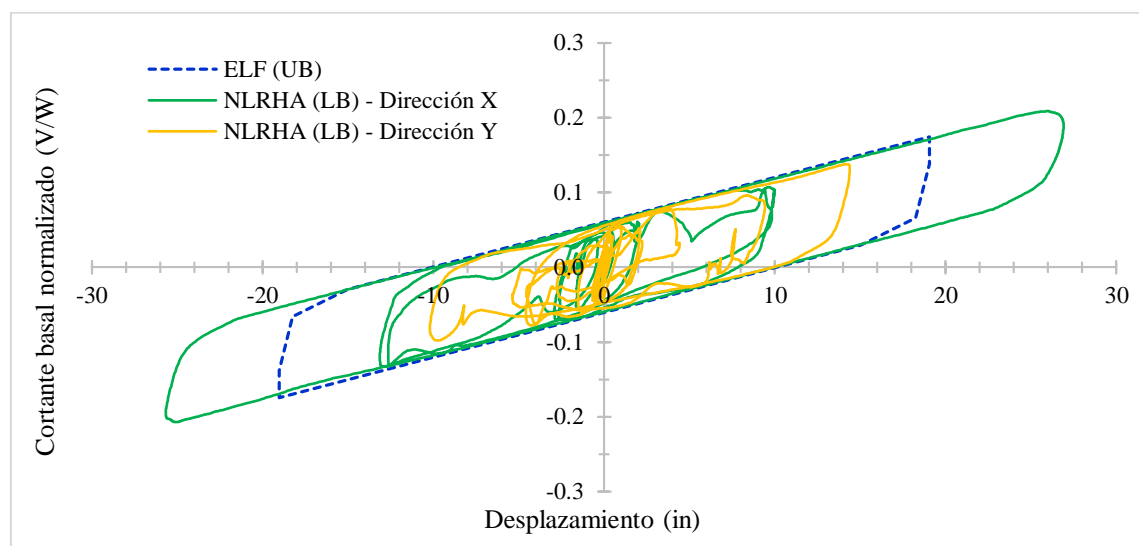


Figura 6.25 Comparación entre la curva monotónica ELF con la generada en Etabs, para propiedades LB.

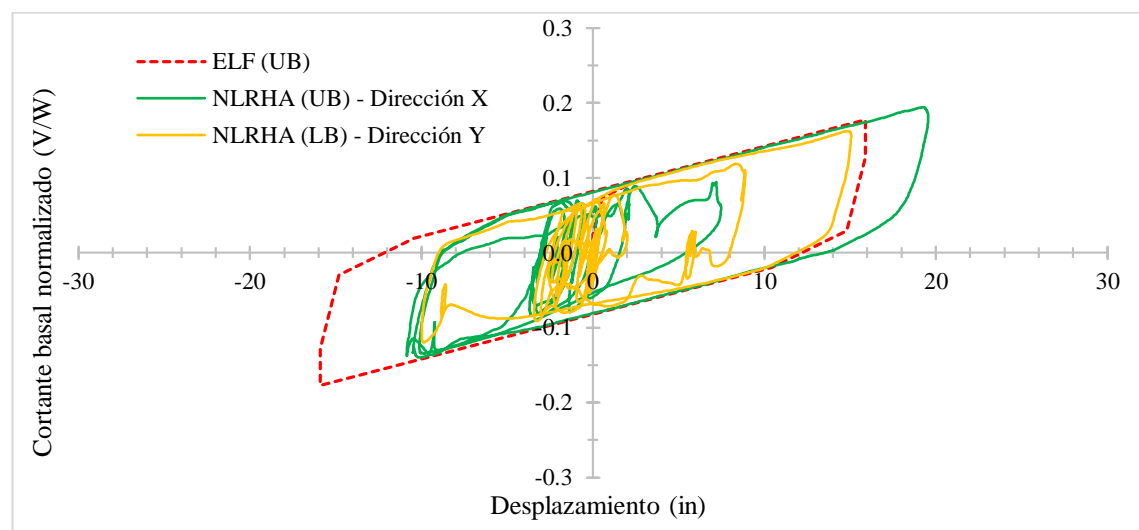
Comportamiento histerético

Se comparan las curvas de histéresis generadas al realizar el NLRHA con la curva de histéresis del análisis ELF.

En la Figura 6.26 se ejemplifica esta comparación para el sismo RSN1158, en donde, la Figura 6.26a es para propiedades LB y la Figura 6.26b para propiedades UB.



(a)



(b)

Figura 6.26 Comparación entre el comportamiento histerético NLRHA y ELF para las propiedades a) LB y b) UB, sismo RSN1158

Tanto en la Figura 6.26a como en la Figura 6.26b, se puede ver la coincidencia entre el comportamiento histerético del análisis no lineal (NLRHA) y del análisis estático (ELF), por lo tanto, se puede decir que la modelación de los aisladores se ha realizado correctamente.

Además, en la Figura 6.26a se puede observar que la curva de histéresis no lineal en la dirección X ha superado el límite de la fase III ($u_{dr1} = 19.86 \text{ in}$), sin embargo, se nota que aún tiene la misma pendiente de la fase III, esto se da porque en el elemento Link “*TPI*” se ingresó capacidades de desplazamiento mayores que los reales (ver Tablas 6.20 y 6.21). Si se hubiera dado la capacidad de desplazamiento real, entonces se tuvieran menores desplazamientos ya que al ingresar en la fase IV y V se rigidiza el sistema.

6.7.5 Resultados NLRHA (Gráficos)

Los resultados del análisis dinámico NLRHA, se presentan desde la Figura 6.27 hasta la Figura 6.33 para las propiedades LB; y desde la Figura 6.34 hasta la Figura 3.40 para las propiedades UB. En cada Figura se muestra el comportamiento histerético, la respuesta de desplazamiento y cortante basal del sistema de aislación.

Para propiedades LB

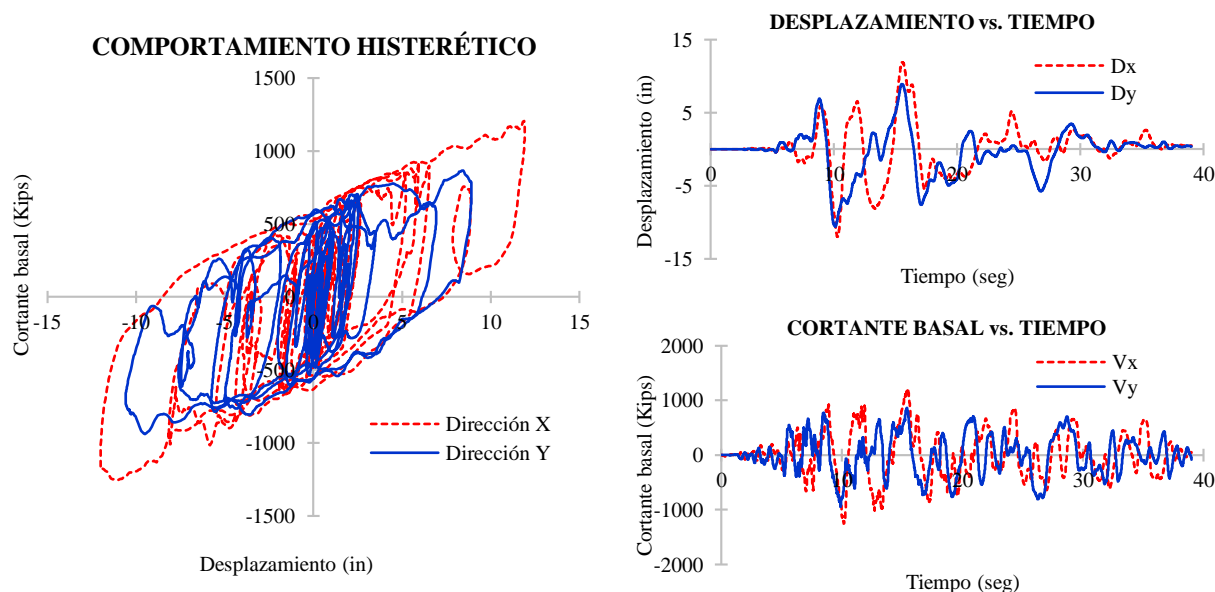


Figura 6.27 Resultados del sismo RSN175 para propiedades LB

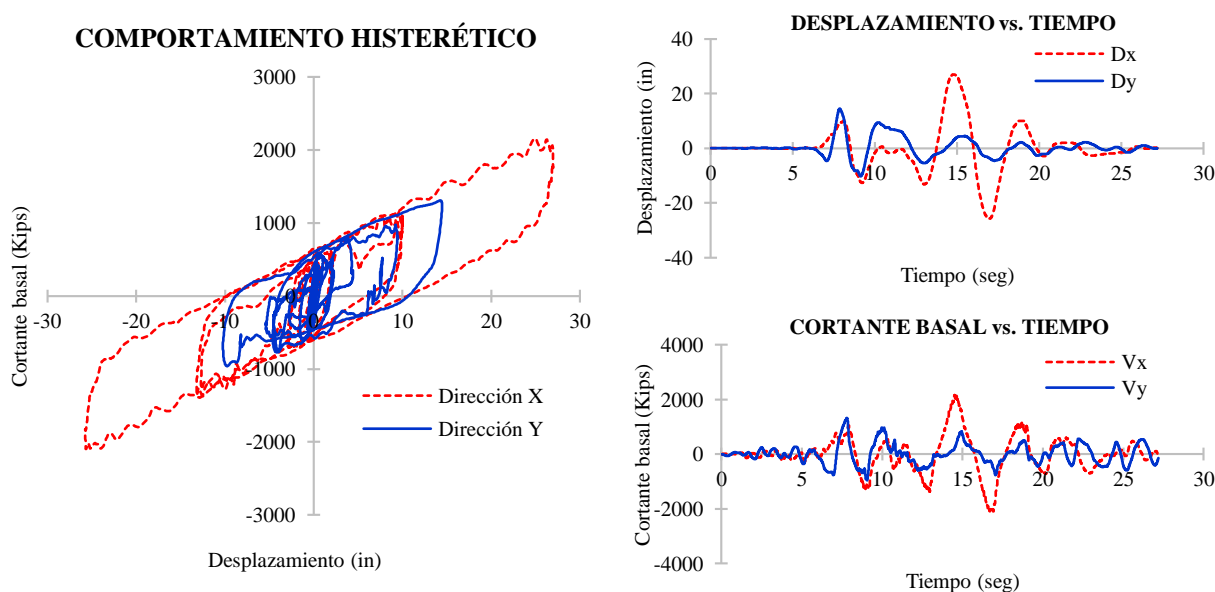


Figura 6.28 Resultados del sismo RSN1158 para propiedades LB

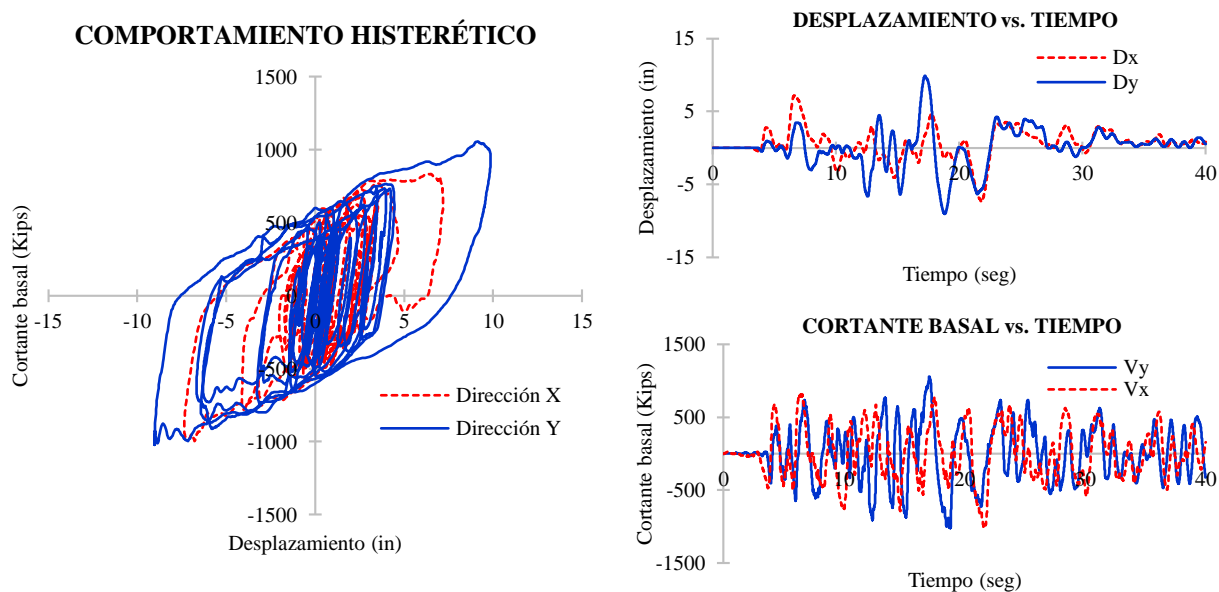


Figura 6.29 Resultados del sismo RSN728 para propiedades LB

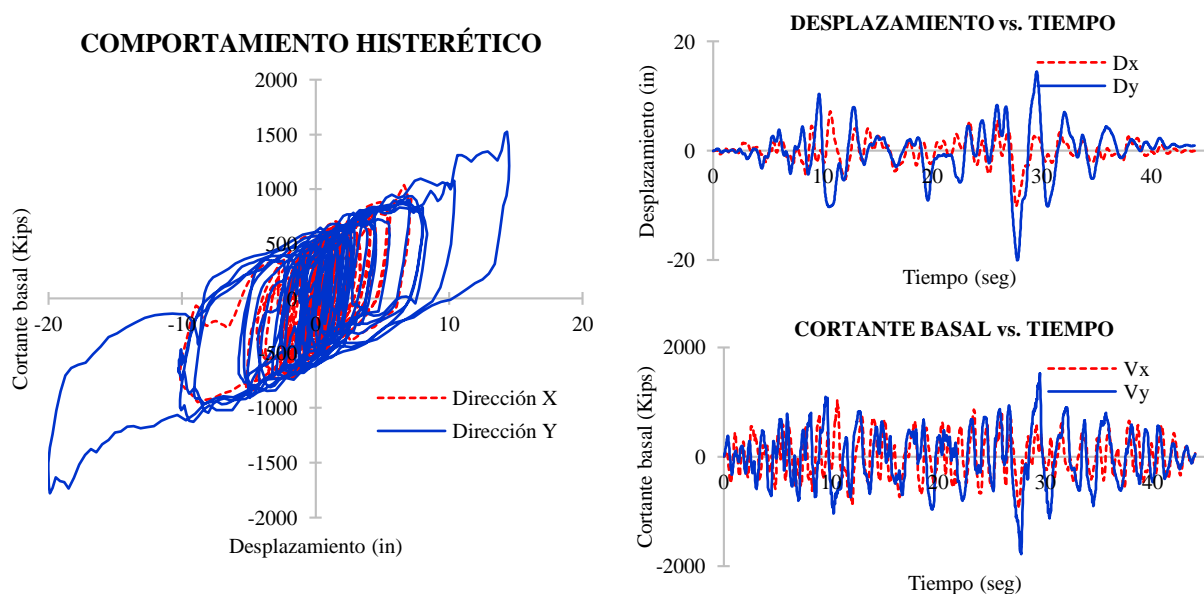


Figura 6.30 Resultados del sismo RSN864 para propiedades LB

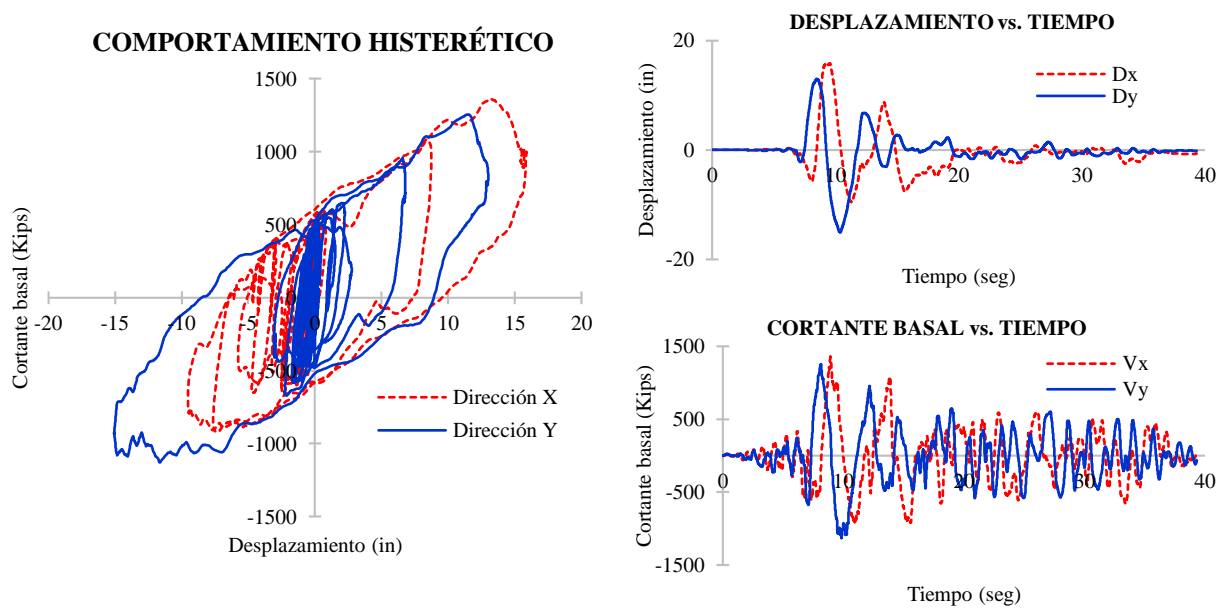


Figura 6.31 Resultados del sismo RSN187 para propiedades LB

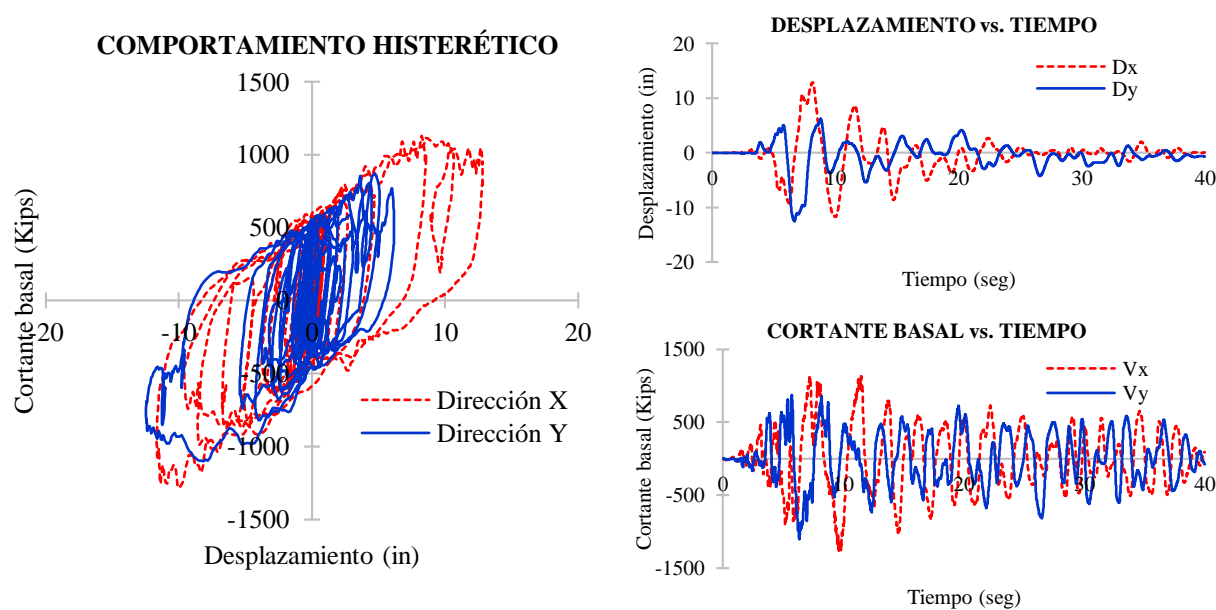


Figura 6.32 Resultados del sismo RSN549 para propiedades LB

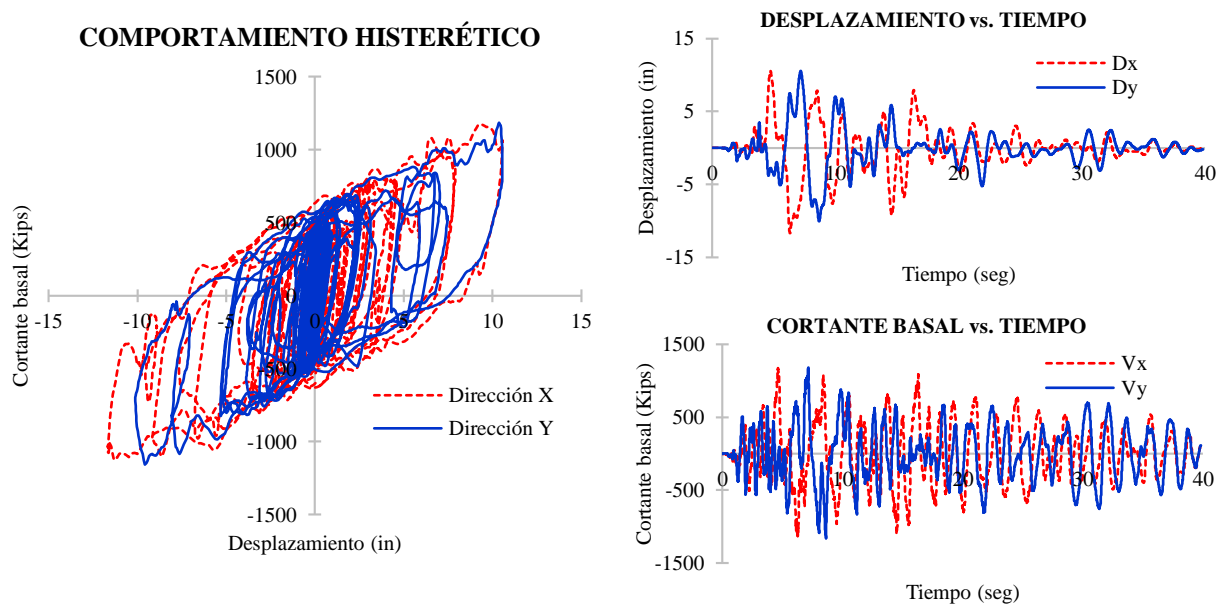


Figura 6.33 Resultados del sismo RSN458 para propiedades LB

Para propiedades UB

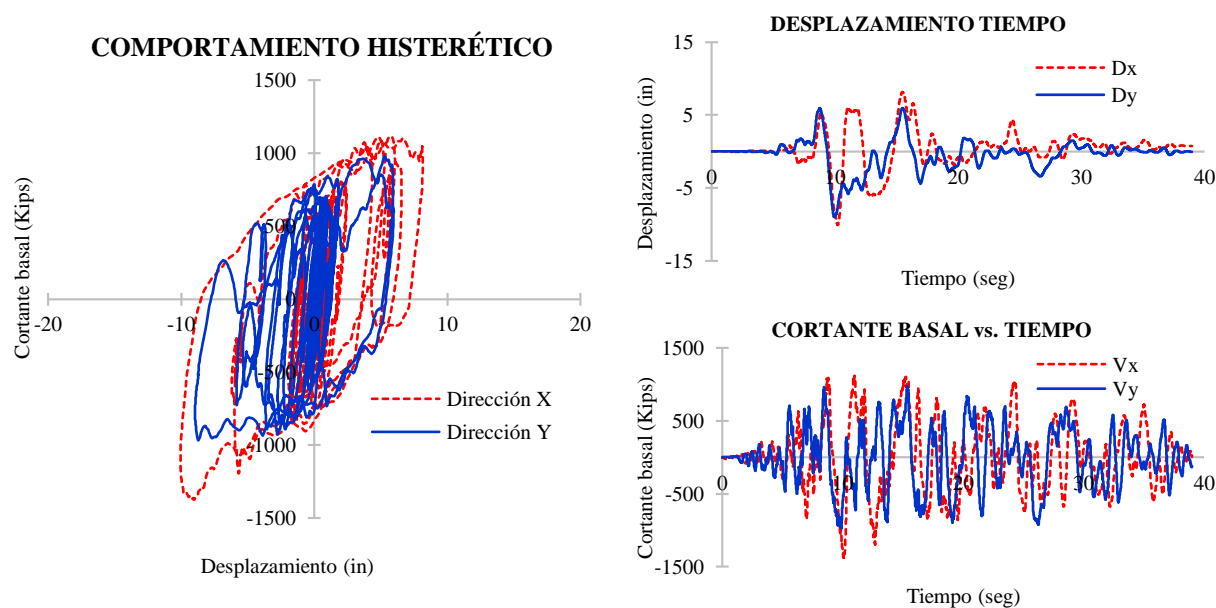


Figura 6.34 Resultados del sismo RSN175 para propiedades UB

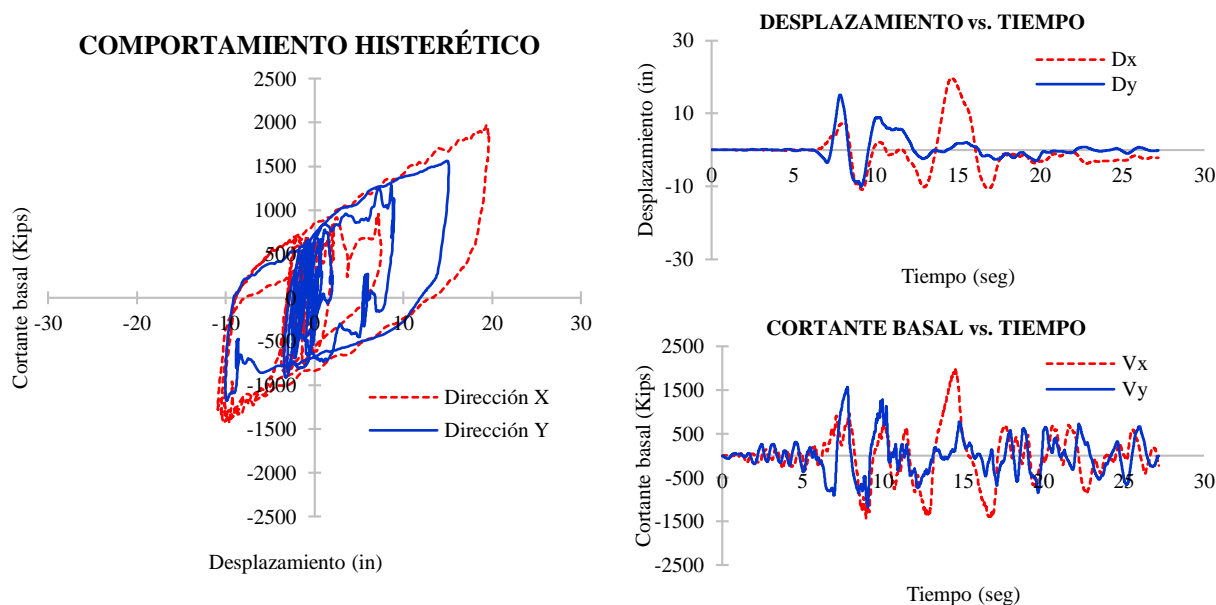


Figura 6.35 Resultados del sismo RSN1158 para propiedades UB

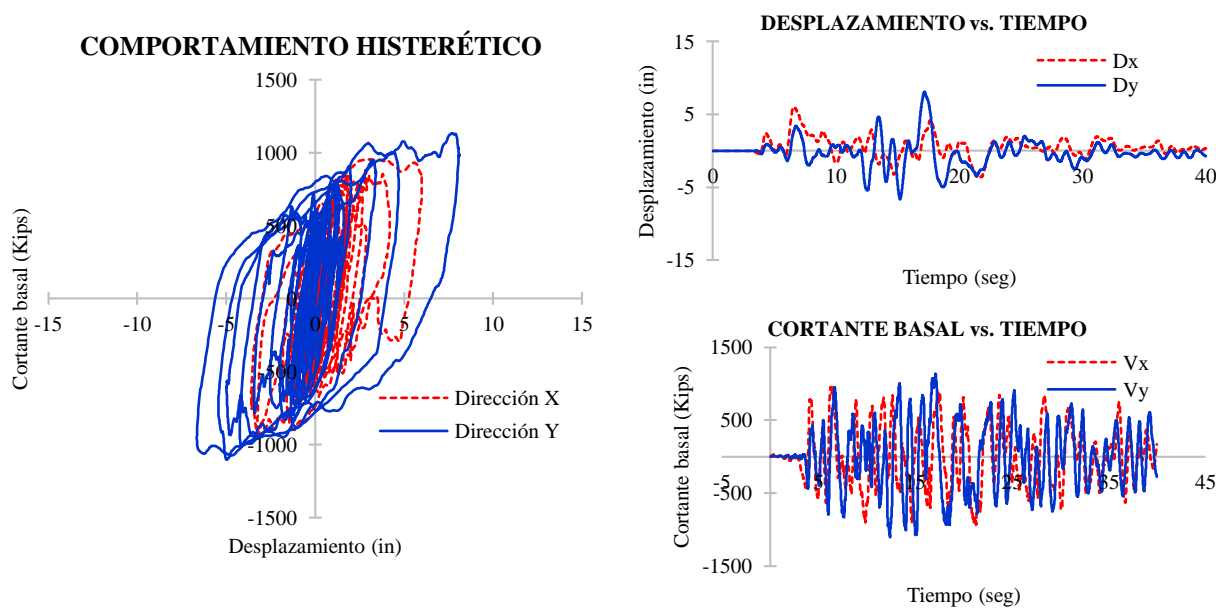


Figura 6.36 Resultados del sismo RSN728 para propiedades UB

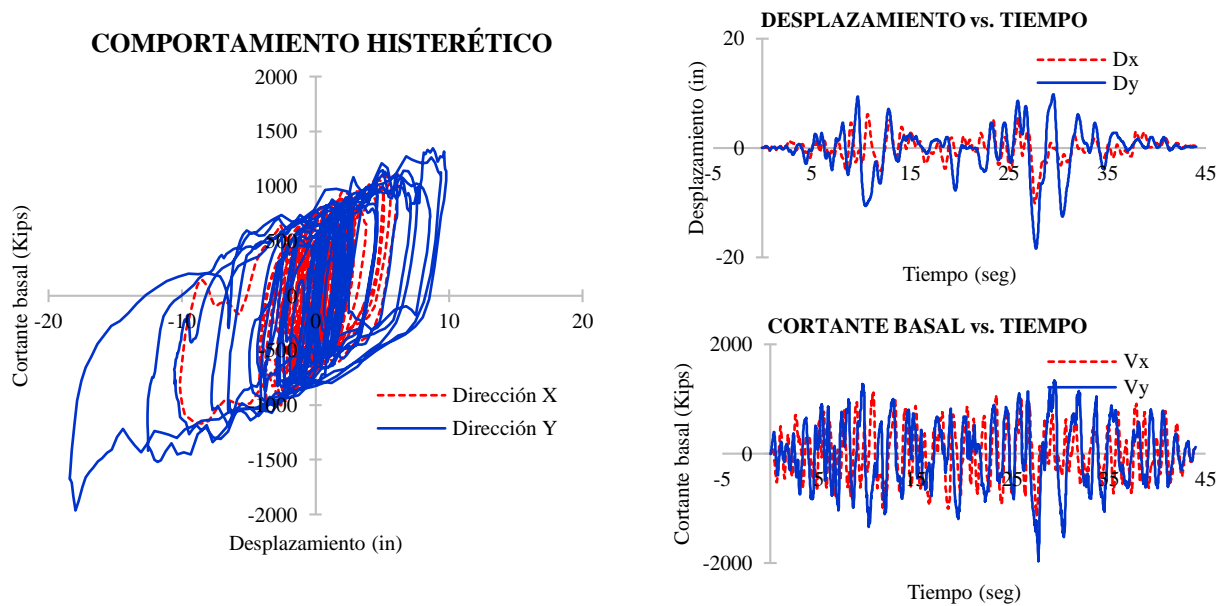


Figura 6.37 Resultados del sismo RSN864 para propiedades UB

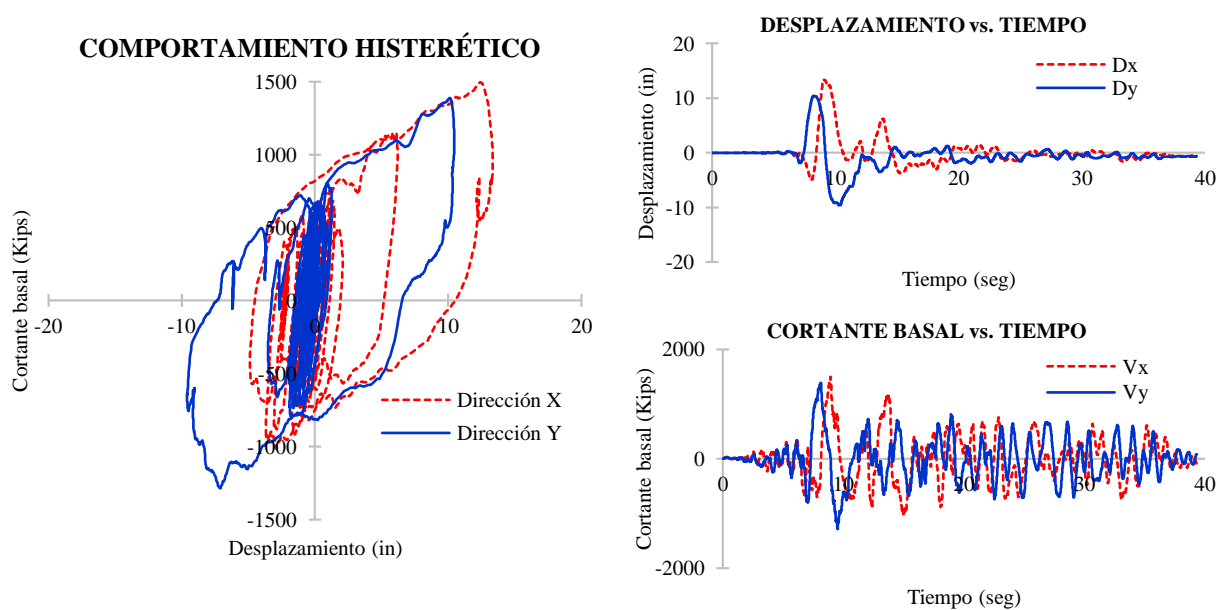


Figura 6.38 Resultados del sismo RSN187 para propiedades UB

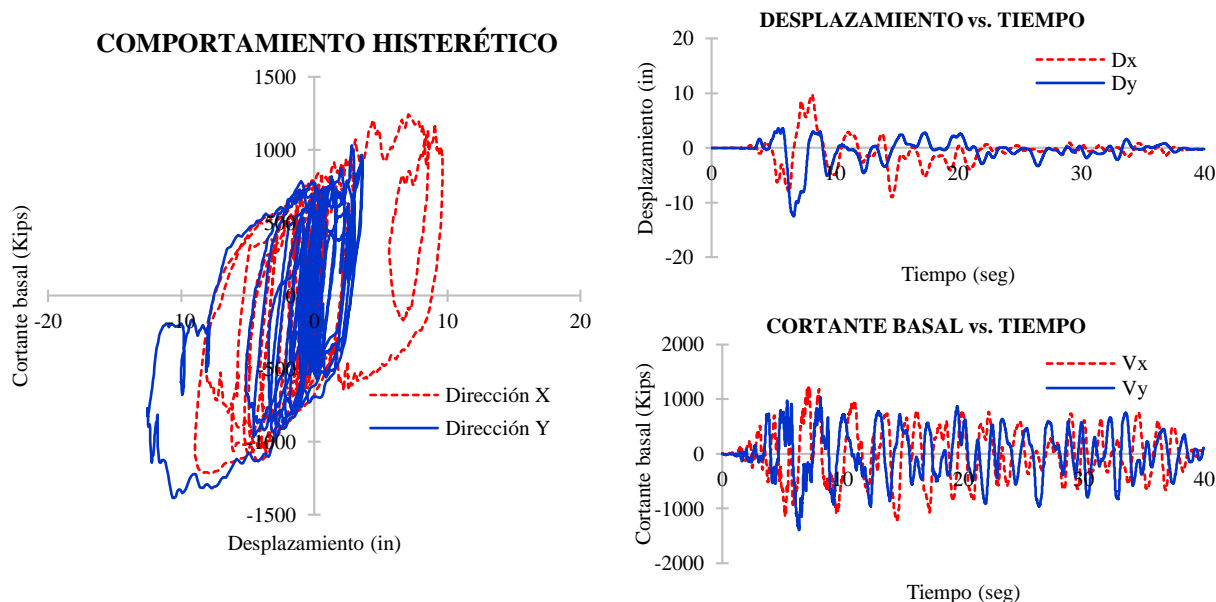


Figura 6.39 Resultados del sismo RSN549 para propiedades UB

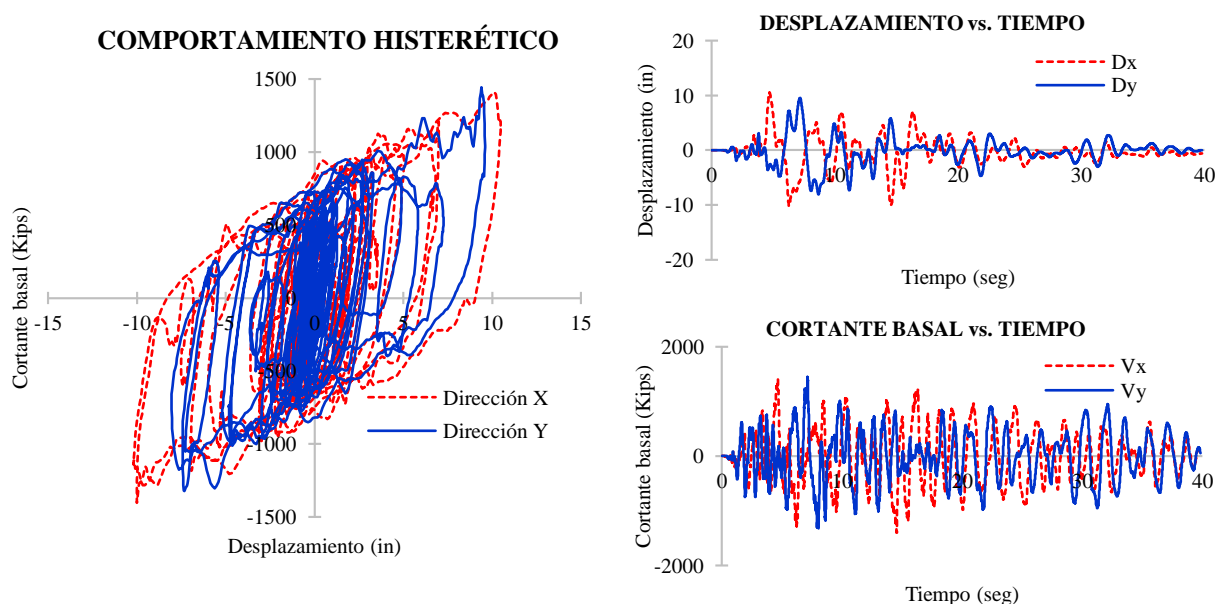


Figura 6.40 Resultados del sismo RSN458 para propiedades UB

De las Figuras anteriores se puede concluir que los sismos RSN1158 y RSN864 producen los máximos valores de respuesta, mientras que, los sismos el sismo RSN728 y RSN458 produce los menores valores de respuesta. Esto se puede ver visualizar de mejor manera en los orbitales de

desplazamiento que se presentan en la Figura 6.41. En donde, la Figura 6.41a es para propiedades LB y la Figura 6.41b es para propiedades UB.

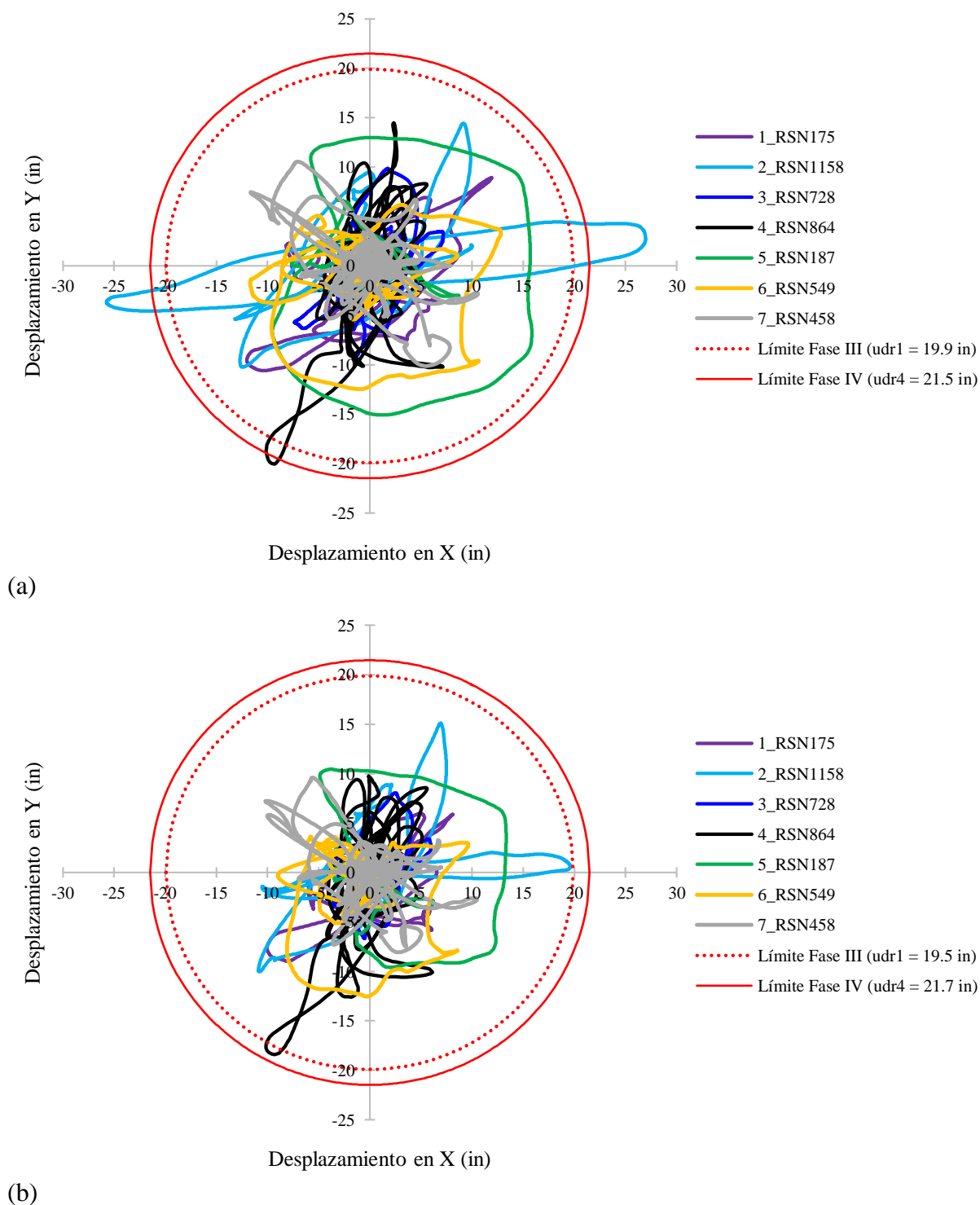


Figura 6.41 Orbitales de desplazamiento para propiedades a) LB y b) UB

Además, en la Figura 6.41a se observa que los sismos RSN1158 y RSN864 superan las fases de movimiento III y IV del aislador FPT.

6.7.6 Resultados NLRHA (Tablas)

Desplazamiento máximo (D_M)

El desplazamiento máximo se calcula de la misma forma que en el diseño preliminar (es decir, como el promedio de los desplazamientos picos máximos SRSS de los 7 sismos). Los resultados se resumen en la Tabla 6.22. También se presentan los resultados del análisis ELF para su comparación.

| Id. | SISMO PEER # | Propiedades LB (in) | Propiedades UB (in) |
|-----|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | RSN175 | 15.47 | 12.84 |
| 2 | RSN1158 | 27.11 | 19.63 |
| 3 | RSN728 | 10.01 | 8.46 |
| 4 | RSN864 | 22.15 | 20.70 |
| 5 | RSN187 | 17.75 | 14.35 |
| 6 | RSN549 | 14.34 | 12.88 |
| 7 | RSN458 | 13.84 | 12.49 |
| | PROMEDIO NLRHA | 17.24 | 14.48 |
| | ELF | 19.04 | 15.89 |

Tabla 6.22 Resultados del NLRHA: desplazamiento máximo (D_M)

Cortantes basal (V_b) para el diseño del sistema de aislación

El cortante basal (V_b) se determina aplicando un procedimiento similar al realizado para determina el desplazamiento máximo, esto significa que el cortante basal (V_b) es igual al promedio de los cortantes picos máximos SRSS de los 7 sismos. Los resultados se resumen en la Tabla 6.23. También se presentan los resultados del análisis ELF para la comparación.

| Id. | SISMO PEER # | Propiedades LB (kips) | Propiedades UB (kips) |
|-----|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | RSN175 | 1453 | 1504 |
| 2 | RSN1158 | 2182 | 1977 |
| 3 | RSN728 | 1126 | 1276 |
| 4 | RSN864 | 1899 | 2080 |
| 5 | RSN187 | 1445 | 1498 |
| 6 | RSN549 | 1304 | 1420 |
| 7 | RSN458 | 1277 | 1505 |
| | PROMEDIO NLRHA | 1526 (0.152W) | 1608 (0.160W) |
| | ELF | 1747 (0.174W) | 1777 (0.177W) |

Tabla 6.23 Resultados del NLRHA: Cortantes basales (V_b)

Cortantes basal (V_S) para el diseño de la superestructura

En la Tabla 6.24 se presentan un resumen de los cortantes basales en las 2 direcciones ortogonales V_X y V_Y .

| Id. | SISMO PEER # | Propiedades LB (kips) | | Propiedades UB (kips) | |
|-----|-----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | | V_X | V_Y | V_X | V_Y |
| 1 | RSN175 | 1207 | 941 | 1117 | 967 |
| 2 | RSN1158 | 2158 | 962 | 1969 | 1179 |
| 3 | RSN728 | 834 | 1021 | 954 | 1104 |
| 4 | RSN864 | 1039 | 1779 | 1119 | 1962 |
| 5 | RSN187 | 1361 | 1128 | 1498 | 1287 |
| 6 | RSN549 | 1128 | 1101 | 1241 | 1387 |
| 7 | RSN458 | 1175 | 1159 | 1411 | 1322 |
| | PROMEDIO NLRHA | 1272 (0.127W) | 1156 (0.115W) | 1330 (0.133W) | 1315 (0.131W) |
| | ELF | 1747 (0.174W) | | 1777 (0.177W) | |

Tabla 6.24 Resultados del NLRHA: Cortantes basales (V_S)

Cargas verticales

Para el diseño de los aisladores, las combinaciones de cargas que se deben considerar son las siguientes:

Carga vertical gravitacional: $1.2D + 1.6L$

Y según la Sección 17.2.7.1 del ASCE7-16

1. Carga vertical promedio: Para ejecutar los ensayos

$$1.0D + 0.5L$$

2. Carga vertical máxima:

$$1.2D + 0.5L + 1.0E \text{ (combinación 6 de la Sección 2.3.6, ASCE7-16)}$$

$$\text{Tal que: } E = E_h + E_v \text{ (ecuación 12.4-1 de la Sección 12.4.2, ASCE7-16)}$$

3. Carga vertical mínima:

$$0.9D - 1.0E \text{ (Combinación 7 de la Sección 2.3.6, ASCE7-16)}$$

$$\text{Tal que: } E = E_h - E_v \text{ (ecuación 12.4-2 de la Sección 12.4.2, ASCE7-16)}$$

El efecto del sismo sísmico MCE se calcula considerando el sismo horizontal (E_h) y del sismo vertical (E_v) de la siguiente manera:

$$E_h = \rho Q_E \quad (\text{ecuación 12.4-3, ASCE7-16})$$

$$E_v = 0.2S_{DS}D \rightarrow 0.2S_{MS}D \quad (\text{ecuación 12.4-4a, ASCE7-16})$$

donde:

ρ : factor de redundancia

Q_E : es el efecto sísmico del sismo horizontal, que es obtenido directamente del análisis dinámico NLRHA.

Las combinaciones 2 y 3 mostradas anteriormente son requeridos por la Sección 17.2.4.6 del ASCE7-16 para el análisis de estabilidad. La combinación 2 (carga máxima) es usado para verificar la capacidad del aislador bajo un desplazamiento horizontal igual al D_{TM} . En cambio, la combinación 3 (carga mínima) se usa para verificar si ocurren tracciones y/o uplift en el aislador.

Los resultados de las cargas axiales, para las propiedades UB, de cada aislador se presentan en las Tablas 6.25, 6.26 y 6.27. No se presentan los resultados para propiedades LB debido a que fueron menores que los calculados con propiedades UB.

| Ejes | A | B | C | D | E | F |
|------|-----|------|------|------|------|-----|
| 6 | - | 494 | 678 | 678 | 494 | - |
| 5 | 493 | 1127 | 1417 | 1417 | 1127 | 493 |
| 4 | 678 | 1417 | 1398 | 1398 | 1417 | 678 |
| 3 | 678 | 1417 | 1398 | 1398 | 1417 | 678 |
| 2 | 493 | 1127 | 1417 | 1417 | 1127 | 493 |
| 1 | - | 494 | 678 | 678 | 494 | - |

Tabla 6.25 Cargas axiales gravitacionales (kips) (1.2D+1.6L)

| Ejes | A | B | C | D | E | F |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 6 | - | 744 | 637 | 646 | 785 | - |
| 5 | 804 | 784 | 931 | 932 | 783 | 839 |
| 4 | 686 | 931 | 915 | 915 | 932 | 695 |
| 3 | 689 | 933 | 916 | 915 | 932 | 709 |
| 2 | 804 | 784 | 932 | 931 | 784 | 807 |
| 1 | - | 746 | 640 | 638 | 794 | - |

Tabla 6.26 Cargas axiales máximas en los aisladores (kips) (1.2D+0.5L+ E_h + E_v), UB

| Ejes | A | B | C | D | E | F |
|------|------|------|-----|-----|------|------|
| 6 | - | -157 | 142 | 133 | -198 | - |
| 5 | -218 | 436 | 508 | 506 | 437 | -253 |
| 4 | 93 | 508 | 504 | 504 | 507 | 84 |
| 3 | 90 | 506 | 504 | 505 | 507 | 70 |
| 2 | -217 | 436 | 507 | 508 | 436 | -220 |
| 1 | - | -159 | 139 | 141 | -207 | - |

Tabla 6.27 Cargas axiales mínimas en los aisladores (kips) (0.9D - E_h + E_v), UB

De las Tablas 6.25 y 6.26 se tiene que, el aislador debe tener una capacidad a carga axial mayor a:

Carga axial gravitacional: 1417 kips (de la Tablas 6.24)

Carga axial máxima: 933 kips (de la Tablas 6.25)

La Tabla 6.27 muestra que existen cargas axiales negativas, esto significa que existe tracción en los aisladores. Sin embargo, los aisladores FPT (y en general los FPS) no tienen capacidad a tracción por lo que las tracciones se deben entender como el levantamiento de los aisladores (uplift). La carga vertical mínima es de -253 kips y ocurre en el eje F5.

Debido a que se dieron cargas negativas fue necesario realizar nuevamente el análisis para determinar el desplazamiento vertical que ocurre específicamente en el aislador ubicado en el eje F5. Los resultados del desplazamiento vertical en función del tiempo, se muestran a continuación:

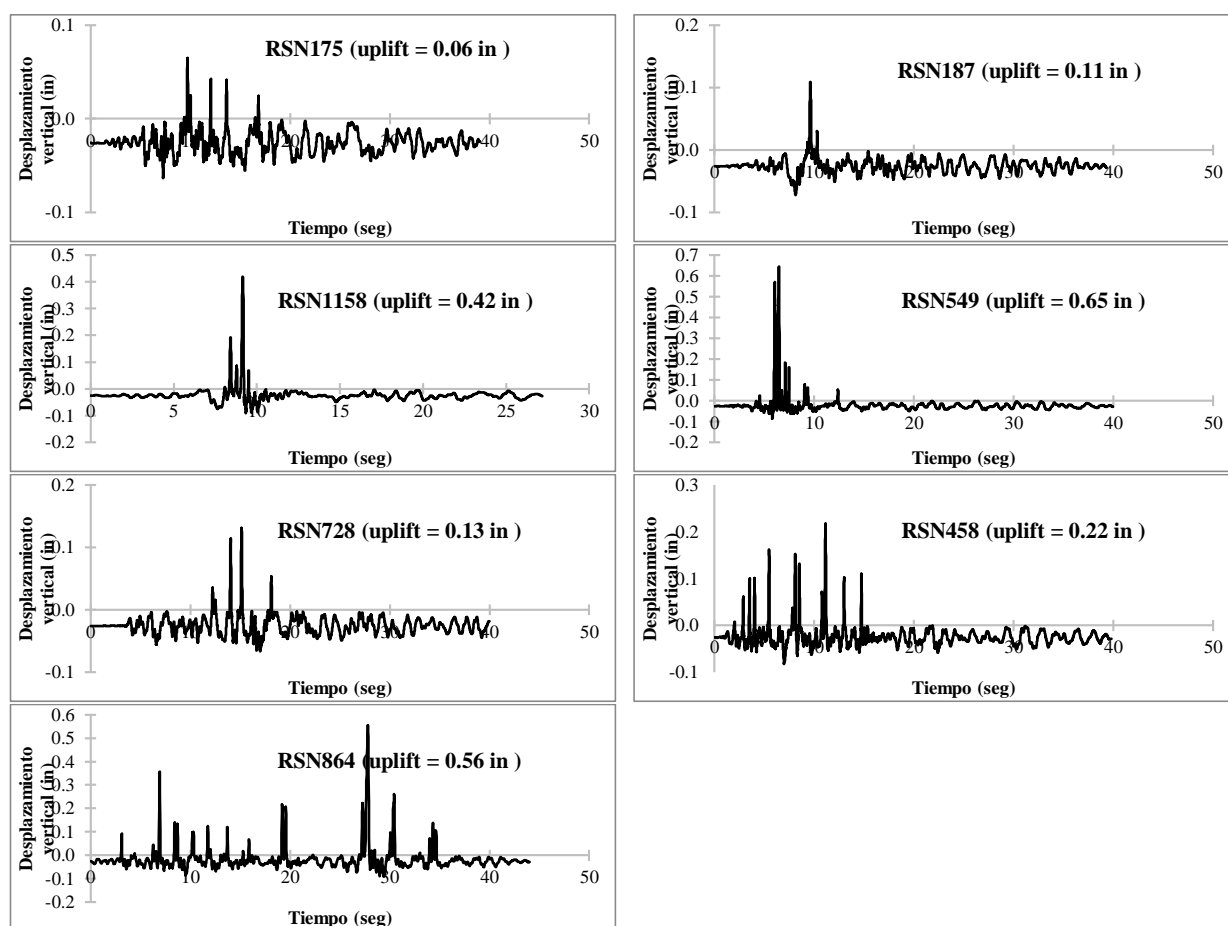


Figura 6.42 Desplazamiento vertical vs. tiempo para el aislador ubicado en el eje F5, UB

De las Figuras anteriores se tiene que el uplift máximo es de 0.65in que ocurre en el sismo RSN549. Este valor debe ser chequeado con la capacidad de desplazamiento vertical que dispone el aislador (capacidad que está en función de la altura del anillo de retención), sin embargo, en el presente ejemplo no se realiza este chequeo debido a que la capacidad de desplazamiento vertical del aislador analizado es desconocida.

6.8 Requisitos mínimos del código

En esta Sección se determinan los desplazamientos y cortantes mínimos requeridos para diseño. Para esto se aplican reducciones a los resultados del análisis ELF y se comparan con los resultados del análisis dinámico NLRHA. Aunque este procedimiento puede ser omitido, si se asumen directamente los resultados del análisis ELF para el diseño.

Desplazamiento total máximo D_{TM}

El desplazamiento total máximo no puede ser tomado como menor al 80% de D_{TM} determinado mediante el análisis ELF. Además, D_M puede ser remplazado por D'_M el cual se calcula con la ecuación (C17.6-1) presentado en la Sección 5.5.2.

Para aplicar la ecuación (C17.6-1) se debe determinar el periodo empotrado de la estructura (T), el cual mediante el modelo en Etabs se obtuvo $T = 0.48 \text{ seg}$. Sin embargo, el periodo calculado en Etabs, también está limitado por el periodo calculado con la Sección 12.8-7 del ASCE7-16, este límite de periodo se determina a continuación:

Periodo T calculado con la Sección 12.8-7 del ASCE7-16:

$$T_a = C_t h_n^x$$

donde:

$h_n = 72 \text{ ft}$ altura total del edificio

$C_u = 1.4$ Tabla 12.8-1, ASCE7-16

$C_t = 0.02$ Tabla 12.8-2, ASCE7-16

$x = 0.75$ Tabla 12.8-2, ASCE7-16

Remplazando, se tiene:

$$T = T_a = 1.4(0.02(72^{0.75})) = 0.69 \text{ seg}$$

$T_{Etabs} = 0.49 \text{ seg} < T_{ASCE7-16} = 0.69 \text{ seg} \rightarrow \text{OK}$. Por lo tanto, se usa $T = 0.48 \text{ seg}$ en la ecuación (C17.6-1)

En la Tabla 6.28 se aplica las reducciones al desplazamiento D_M que fue calculado con el método ELF, y se compara con el desplazamiento D_M determinado mediante NLRHA.

| Método de análisis | Parámetro | Ecuación | Propiedades LB (in) | Propiedades UB (in) |
|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| ELF | D'_M | Ecuación (C17.6-1) | 18.85 | 15.69 |
| | D_M (reducido 20%) | $0.8 \times D'_M$ | 15.08 | 12.55 |
| NLRHA | D_M | - | 17.24 | 14.48 |

Tabla 6.28 Desplazamiento máximo (D_M) requerido para diseño

De la Tabla anterior se concluye que el desplazamiento máximo, D_M , requerido por el ASCE7-16 es de 17.24in correspondiente a las propiedades LB del análisis sísmico NLRHA.

D_M es amplificado por 1.15 para obtener D_{TM} ,

$$D_{TM} = 1.15 \times 17.24in = 19.83in$$

La capacidad de desplazamiento del aislador FPT8833 es de 22.10in que es mayor 19.83in, por lo tanto, el aislador FPT8833 cumple con los requisitos del Capítulo 17 del ASCE7-16 en términos de desplazamientos.

Cortante basal (V_b) para el diseño del sistema de aislación

El sistema de aislación, fundaciones y todos los elementos estructurales que están bajo el nivel de base deben ser diseñados con una fuerza cortante no menor a $0.9V_b$ (V_b calculado con el método ELF).

En la Tabla 6.29 aplica la reducción de $0.9V_b$ al método ELF y se compara con los resultados calculados con el método NLRHA.

| Método de análisis | Parámetro | Ecuación | Propiedades LB (kips) | Propiedades UB (kips) |
|--------------------|----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| ELF | V_b (reducido 10%) | $0.9V_b$ | 1573 | 1600 |
| NLRHA | V_b | - | 1526 | 1608 |

Tabla 6.29 Cortante basal (V_b) requerido para diseño

De la Tabla anterior se tiene que el cortante basal, V_b , requerido para el diseño es de 1608 kips, correspondiente a las propiedades UB del análisis sísmico NLRHA.

$$V_b = 1608 \text{ kip} \rightarrow 0.160W$$

Cortantes basal (V_s) para el diseño de la superestructura

El cortante basal, V_s , calculado con el método ELF puede ser reducido en 80% si la estructura no tiene irregularidades, pero si la estructura tiene irregularidades se debe usar el 100% V_s . En nuestro caso, la estructura tiene irregularidad en planta por lo que se usa 100% V_s .

El cálculo de V_s se resume en la Tabla 6.29:

| Método de análisis | Parámetro | Referencia | Propiedades LB (kips) | | Propiedades UB (kips) | |
|--------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| ELF | V_b (reducido 0%) | Tabla 6.18 | 1747 | | 1777 | |
| | V_{st} | Tabla 6.18 | 1593 | | 1675 | |
| | V_s | Tabla 6.18 | 797 | | 838 | |
| NLRHA | V_s | Tabla 6.24 | V_x | V_y | V_x | V_y |
| | | | 1272/2 | 1156/2 | 1330/2 | 1315/2 |
| | | V/R_I (para $R_I = 2$) | 636 | 578 | 665 | 658 |

Tabla 6.30 Cortante basal (V_s) requerido para diseño

Evidentemente, el cortante que debe ser usado para diseñar la superestructura debe ser $V_s = 838kips$ (para las propiedades UB, del método ELF), pero V_s no puede ser menor a $1203kips$ (ver Tabla 6.19). Por lo tanto V_s requerido para el diseño es:

$$V_s = 1203kips$$

Escalamiento de resultados:

Para realizar el diseño de los elementos estructurales del edificio usando los modelos de Etabs, en primer lugar, se deben escalar los resultados del análisis NLRHA, estos factores de escala se calculan en la siguiente Tabla:

| Parámetro | Resultados NLRHA | Modelo Etabs | Mínimos ASCE7-16 | Factor de escala | Comentarios |
|-----------|------------------------------------|--------------|------------------|----------------------|--------------------------|
| D_M | 17.24 in | Lower Bound | 15.08 in | $15.08/17.24 = 0.87$ | No requiere escalamiento |
| V_b | 1608 kips | Upper Bound | 1600 kips | $1600/1608 = 0.99$ | No requiere escalamiento |
| V_s | 658 kips Mín. (dir. X o dir. Y) | Upper Bound | 1203 kips | $1203/658 = 1.83$ | Se requiere escalar |

Tabla 6.31 Escalamiento de resultados del método NLRHA a los mínimos requeridos por el ASCE7-16

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- ✓ Se ha presentado la base teórica y la formulación de los aisladores FPT, los cuales han permitido comprobar ciertas propiedades inherentes de los aisladores FPT que son beneficiosas para las estructuras. El primero, es la independencia entre el periodo de vibración y la carga soportada, esto permite realizar el prediseño de los aisladores sin tener conocimiento de las cargas de la edificación. El segundo, es la capacidad de reducir o eliminar la torsión en planta en estructuras irregulares, esto como consecuencia de que el centro de rigidez del sistema de aislación coincide con el centro de masa de la estructura aislada.
- ✓ Se encontró que las propiedades que más influyen en el comportamiento de un aislador FPT son los coeficientes de fricción y los radios de curvatura. Los coeficientes de fricción aumentan el amortiguamiento y los radios de curvatura incrementan el periodo. Para la selección de estas propiedades se debe tener en cuenta la capacidad de recentrado, para el cual se determinó cualitativamente que un aislador FPT tiene buena capacidad de recentrado cuando se combinan: radios de curvatura pequeños con fricciones grandes y radios de curvatura grandes con coeficientes de fricción pequeños.
- ✓ En base al método de diseño aplicado, se concluye que el aislador FPT con radios efectivos $R_{ef2} = R_{ef3} = 5.5 \text{ in}$ y $R_{ef1} = R_{ef4} = 83.5 \text{ in}$ y coeficientes de fricción nominales iguales a $\mu_2 = \mu_3 = 0.02$, $\mu_1 = 0.06$ y $\mu_4 = 0.08$, es el que mejor se acomoda para el edificio de acero de 6 pisos. También, se calcula que el aislador con diámetro en planta de 33 in es el adecuado para acomodar desplazamientos horizontales ante eventos sísmicos MCE
- ✓ El procedimiento de diseño presentado ha permitido diseñar con gran certeza un aislador que cumple con los requerimientos de la Norma ASCE7-16, esto debido a que de forma preliminar se aplica un procedimiento de diseño que tiene en cuenta la no linealidad de los aisladores FPT (permitiendo estimar con gran precisión el comportamiento real de los aisladores). Además, el procedimiento ha permitido controlar los parámetros de respuesta de desplazamiento y cortante basal, así como también, se ha comprobado que el procedimiento es eficiente en términos de tiempo debido a que el procedimiento usa un modelo simplificado de 1 grado de libertad, el cual reduce enormemente la duración de los análisis.
- ✓ Usando los resultados del método de análisis estático para propiedades de fricción UB se obtuvo que el cortante basal llega a tan sólo $0.18W$, esta reducción se logra por el incremento del periodo empotrado de 0.48 segundos a un periodo aislado de 3.0 segundos, y también, por el incremento del amortiguamiento a 28% . Por lo tanto, se concluye que efectivamente los aisladores FPT son capaces de reducir la demanda sísmica, con lo cual se da la posibilidad de diseñar estructuras elásticas que ya no requieren incursionar en el rango inelástico. En contraste, si se quisiera diseñar elásticamente el edificio de acero de 6 pisos con base fija (periodo de 0.48 segundos) se requeriría que la estructura tenga una capacidad a cortante de $1.5W$ (considerando el sismo MCE) que resulta imposible y/o antieconómico.

Recomendaciones

- ✓ Cuando se requiera diseñar aisladores FPT para usar en estructuras que deben mantenerse operativas después de ocurrido un sismo, se recomienda usar otros documentos técnicos como el “Estándar para Funcionalidad Continua” de EPS (Earthquake Protection System), mismo contempla criterios de diseño más rigurosos.
- ✓ Antes de modelar los aisladores FPT en los softwares OpenSees o Etabs, se recomienda revisar exhaustivamente los respectivos MANUALES, de tal manera que se evite ingresar información errónea.
- ✓ Para diseñar los elementos estructurales (no contemplado en este trabajo de titulación), se debe considerar los efectos $P-\Delta$ generados por el desplazamiento relativo de los aisladores.

Bibliografía

- AASHTO. (2014). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 4th Edition*. Subcommittee on Bridges and Structures Staff and Transportation Officials. Subcommittee on Bridges.
- Aguiar, R., Almazán, J., Dechent, P., & Suárez, V. (2008). *Aisladores de Base Elastomericos y FPS*.
- Amaral, F., & Guerreiro, L. (2014). Effect of the vertical component of earthquake on the response of a friction pendulum bearing base isolation system. *2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul* (pp. 25–29).
- ASCE. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (Vol. 7). Washington D.C.: American Society of Civil Engineers.
- ATC. (2016). ATC, Earthquake Reconnaissance April 16th, Muisne Ecuador, Applied Technology Council. *California*.
- Computers and Structures, I. (2016). Etabs. Berkeley, California, USA.
- Constantinou, M. (2004). Friction pendulum double concave bearing. *NEES report*.
- Constantinou, M., Aguiar, R., Morales, E., & Caiza, P. (2016). Desempeño del aislador FPT8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del centro de investigaciones y de post grado de la UFA-ESPE. *Revista Internacional de Ingenieria de Estructuras*, 21(1), 1–25.
- Constantinou, M., Kalpakidis, I., Filiatrault, A., & Lay, R. (2011). *LRFD-based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators*. MCEER.
- Constantinou, M., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., & Fenz, D. (2006). Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading. Retrieved March 8, 2018, from <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/bitstream/handle/10477/25246/07-0012.pdf?sequence=3>
- CSI. (2016). CSI Analysis Reference Manual. *Berkeley (CA, USA): Computers and Structures INC*, (July), 534.
- Dao, N. D. (2017). Triple Friction Pendulum Element - OpenSeesWiki. Retrieved August 8, 2017, from http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Triple_Friction_Pendulum_Element
- Dao, N. D., Ryan, K. L., Sato, E., & Sasaki, T. (2013). Predicting the Displacement of Triple PendulumTM Bearings in a Full Scale Shaking Experiment using a Three-Dimensional Element. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42(11), 1677–1695.
- Delgado, I., Aguiar, R., & Caiza, P. (2017). Bilinear Model Proposal for Seismic Analysis Using Triple Friction Pendulum (TFP) Bearings. Retrieved March 12, 2018, from https://file.scirp.org/pdf/_2017020313342770.pdf
- EPS. (2017). Earthquake Protection Systems: Implementation of Seismic Isolation & Bearings

- Manufacturer, Mare Island, Vallejo, California. Retrieved September 18, 2017, from <http://www.earthquakeprotection.com/>
- FEMA. (2016). *2015 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples*. Prepared for the Federal Emergency Management Agency of the U.S. Department of Homeland Security By the Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences.
- Fenz, D., & Constantinou, M. (2006). Behaviour of the double concave friction pendulum bearing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(11), 1403–1424.
- Fenz, D., & Constantinou, M. (2008a). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 37(2), 163–183.
- Fenz, D., & Constantinou, M. (2008b). mechanical behavior of multi-spherical sliding bearing. *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research MCEER*.
- Fenz, D., & Constantinou, M. (2008c). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 37(2), 185–205.
- Fenz, D., & Constantinou, M. (2008d). Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), 1011–1028.
- Iqbal, A. (2006). Friction Pendulum System in Seismic Isolation: Research, Testing and Applications. *Proceedings of 8th U. S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco*, (1760).
- De La Llera, J. C., Inaudi, J., & Lüder, C. (1998). Análisis y Diseño de Sistemas de aislación sísmica y Disipación de energía. *Pontificia Universidad Católica de Chile*.
- Malekzadeh, M., & Taghikhany, T. (2010). Adaptive behavior of double concave friction pendulum bearing and its advantages over friction pendulum systems. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 17(2), 81.
- McVitty, W. J., & Constantinou, M. (2015). Property modification factors for seismic isolators: Design guidance for buildings. *MCEER Report*, 5–15.
- Mills Peninsula Hospital. (2017). Base Isolation | Mills Peninsula Hospital. Retrieved September 20, 2017, from <https://rebuildingmphs.wordpress.com/engineering-2/base-isolation/>
- Mokha, A. S., Amin, N., Constantinou, M., & Zayas, V. (1996). Seismic isolation retrofit of large historic building. *Journal of Structural Engineering*, 122(3), 298–308.
- Richins, B. D. (2011). Evaluation and Seismically Isolated Substructure Redesign of a Typical Multi-Span Pre-Stressed Concrete Girder Highway Bridge, 146.
- Sarkisian, M., Lee, P., Long, E., Shook, D., & Díaz, A. (2013). Experiences with friction pendulum™ seismic isolation in California. *WIT Transactions on the Built Environment* (Vol. 132, pp. 357–368).

- Sarlis, A., & Constantinou, M. (2013). Model of Triple Friction Pendulum Bearing for General Geometric and Frictional Parameters and for Uplift Conditions.
- SEAOC. (2014). “2012 IBC SEAOC Structural/Seismic Design Manual”, Volume 5: Examples for Seismically Isolated Buildings and Buildings with Supplemental Damping. International Building Code. International Code Council: Washington DC, United States.
- Skinner, R. I., Robinson, W. H., & McVerry, G. H. (1993). *An introduction to seismic isolation*. John Wiley & Sons.
- Tsai, C. S., Chiang, T. C., & Chen, B. J. (2005). Experimental evaluation of piecewise exact solution for predicting seismic responses of spherical sliding type isolated structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(9), 1027–1046.
- Zayas, V., Low, S., & Mahin, S. (1987). *The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report*. Berkeley Calif. ;Springfield Va.: Earthquake Engineering Research Center.
- Zayas, V., Low, S., & Mahin, S. (1990). A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, 6(2), 317–333.
- Zayas, V., & Mahin, S. (2010). Seismic design methodology to avoid damage to structures, nonstructural components and contents. *Open Journal of Civil Engineering*, 7(April), 14–31.
- Zayas, V., Mahin, S., & Constantinou, M. (2016). Safe and Unsafe Seismically Isolated Structures, (2016–1).

Anexos

Anexo A: Demostración de las ecuaciones de la Sección 3.4

Demostración 1

Se realiza la demostración de la ecuación (3.17). Ecuación que gobierna el movimiento en la superficie 2 de la Fase de movimiento I.

Ecuaciones de referencia:

Del FBD III (Figura 3.15):

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{f2} \cdot \cos\theta_2 + S_2 \cdot \sin\theta_2 - F_{f1} = 0 \quad (3.15a)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow S_1 + F_{f2} \cdot \sin\theta_2 - S_2 \cdot \cos\theta_2 = 0 \quad (3.15b)$$

$$u_2 = R_{ef2} \cdot \sin\theta_2 \quad (3.15c)$$

Del FBD IV (Figura 3.15):

$$F = F_{f1} \quad (3.16a)$$

$$W = S_1 \quad (3.16b)$$

Demostración:

Despejando S_2 de (3.15a),

$$S_2 = \frac{F_{f1} - F_{f2} \cdot \cos\theta_2}{\sin\theta_2} ; \text{ tal que } F_{f1} = F \quad (D1.1)$$

Remplazando $S_1 = W$ de la ecuación (3.16b) y S_2 de la ecuación (D1.1), en la ecuación (3.15b), y despejando F ,

$$W + F_{f2} \cdot \sin\theta_2 - \frac{F - F_{f2} \cdot \cos\theta_2}{\sin\theta_2} \cdot \cos\theta_2 = 0$$
$$F = W \cdot \frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2} + \frac{F_{f2}}{\cos\theta_2} \quad (D1.2)$$

Despejando $\sin\theta_2$ de la ecuación (3.15c) y remplazando en la ecuación (D1.2)

$$F = W \cdot \frac{u_2/R_{ef2}}{\cos\theta_2} + \frac{F_{f2}}{\cos\theta_2} \quad (D1.3)$$

En general el radio de curvatura R_2 es relativamente grande comparado con el desplazamiento horizontal u_2 , por lo que se puede asumir que $\cos\theta_2 \approx 1$ (Fenz & Constantinou, 2008b),

$$F = \frac{W}{R_{ef2}} u_2 + F_{f2} \quad \text{l. q. q. d.} \quad (D1.4) \text{ ó } (3.17)$$

Demostración 2

Se realiza la demostración de la ecuación (3.20). Ecuación general que gobierna el movimiento en la Fase I.

Ecuaciones de referencia:

$$F = \frac{W}{R_{ef2}} u_2 + F_{f2} \quad (3.17)$$

$$F = \frac{W}{R_{ef3}} u_3 + F_{f3} \quad (3.18)$$

$$u = u_2 + u_3 \quad (3.19)$$

Demostración:

La relación fuerza-desplazamiento total para la fase 1, se determina combinando las ecuaciones (3.17), (3.18) con (3.19), sabiendo que el desplazamiento total viene dado por la suma del desplazamiento en la superficie 2 y 3.

Despejando u_2 y u_3 de (3.17) y (3.18), respectivamente,

$$u_2 = (F - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} \quad (D2.1)$$

$$u_3 = (F - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \quad (D2.2)$$

Remplazando (D2.1) y (D2.2) en la ecuación (3.19), simplificando y despejando F,

$$u = (F - F_{f2}) \frac{R_{ef2}}{W} + (F - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \quad (D2.3)$$

$$u = F \cdot \frac{R_{ef2}}{W} - F_{f2} \cdot \frac{R_{ef2}}{W} + F \cdot \frac{R_{ef3}}{W} - F_{f3} \cdot \frac{R_{ef3}}{W}$$

$$u = F \left(\frac{R_{ef2}}{W} + \frac{R_{ef3}}{W} \right) - F_{f2} \frac{R_{ef2}}{W} - F_{f3} \frac{R_{ef3}}{W}$$

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} u + \frac{F_{f2} R_{ef2} + F_{f3} R_{ef3}}{R_{eff2} + R_{eff3}} \quad l. q. q. d. \quad (D2.4) \text{ ó } (3.20)$$

Demostración 3

Se realiza la demostración de la ecuación (3.21). Ecuación que permite calcular el límite de desplazamiento (u^*) entre la Fase I y la Fase II.

Ecuaciones de referencia:

$$F = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} u + \frac{F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{eff2} + R_{eff3}} \quad (3.20)$$

Demostración:

El límite de desplazamiento (u^*) se da cuando la fuerza sísmica (F) supera la fuerza de fricción de la superficie 1 (F_{f1}). Este valor límite puede ser calculado haciendo $F = F_{f1}$ en la ecuación (3.20).

Remplazando $F = F_{f1}$ en (3.20) y haciendo $u = u^*$, se tiene:

$$F_{f1} = \frac{W}{R_{ef2} + R_{ef3}} u^* + \frac{F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef2} + R_{ef3}} \quad (D3.1)$$

Despejando u^*

$$u^* = \left(F_{f1} - \frac{F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef2} + R_{ef3}} \right) \left(\frac{R_{ef2} + R_{ef3}}{W} \right) \quad (D3.2)$$

Remplazando $F_{fi} = \mu_i W$ y simplificando:

$$u^* = \mu_1 (R_{ef2} + R_{ef3}) - \mu_2 R_{ef2} - \mu_3 R_{ef3} \quad (D3.3)$$

Reorganizando términos:

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{ef2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{ef3} \quad \text{l. q. q. d.} \quad (D3.4) \text{ ó } (3.21)$$

Demostración 4

Se realiza la demostración de la ecuación (3.26). Ecuación que gobierna el movimiento en la superficie 2 de la Fase de movimiento II.

Ecuaciones de referencia:

Del FBD III y IV (Figura 3.17),

$$u_1 = R_{ef1} \cdot \text{sen}\theta_1 \quad (3.22a)$$

$$u_2 = R_{ef2} \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (3.22b)$$

Del FBD III (Figura 3.17),

$$\sum F_x = 0 \quad S_2 \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) - S_1 \text{sen}\theta_1 - F_{f1} \cos\theta_1 = 0 \quad (3.23a)$$

$$\sum F_y = 0 \quad S_1 \cos\theta_1 + F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) - S_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \sin\theta_1 = 0 \quad (3.23b)$$

Del FBD IV (Figura 3.17),

$$\sum F_x = 0 \quad S_1 \sin\theta_1 + F_{f1} \cos\theta_1 - F = 0 \quad (3.24a)$$

$$\sum F_y = 0 \quad W + F_{f1} \sin\theta_1 - S_1 \cos\theta_1 = 0 \quad (3.24b)$$

$$\text{De (3.24a)} \rightarrow S_1 = \frac{F - F_{f1} \cos\theta_1}{\sin\theta_1}$$

$$\text{De (3.24b)} \rightarrow S_1 = \frac{W + F_{f1} \sin\theta_1}{\cos\theta_1}$$

De una demostración similar a la demostración 1:

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} u_1 + F_{f1} \quad (3.25)$$

Demostración:

Despejando S_2 de la ecuación (3.23a)

$$S_2 = \frac{-F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \sin\theta_1 + F_{f1} \cos\theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (D4.1)$$

Remplazando S_2 de la ecuación anterior en la ecuación (3.23b),

$$S_1 \cos\theta_1 + F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) - \frac{(-F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + S_1 \sin\theta_1 + F_{f1} \cos\theta_1)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \sin\theta_1 = 0 \quad (D4.2)$$

despejando F_{f1} ,

$$S_1 \cos\theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} \sin^2(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} \cos^2(\theta_1 + \theta_2) - S_1 \sin\theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \cos\theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) = 0$$

$$S_1 \cos\theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} - S_1 \sin\theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \cos\theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) = 0$$

$$S_1 \cos\theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} - S_1 \sin\theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1}(\cos\theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)) = 0$$

$$F_{f1} = \frac{S_1 \cos\theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} - S_1 \sin\theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)}{(\cos\theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2))} \quad (D4.3)$$

Haciendo $\theta = \theta_1 + \theta_2$ en la ecuación (D4.3)

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (D4.4)$$

$$F_{f1} = \frac{S_1 (\cos\theta_1 \cdot \sin\theta - \sin\theta_1 \cdot \cos\theta) + F_{f2}}{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta + \sin\theta_1 \cdot \sin\theta} \quad (D4.5)$$

Por identidades trigonométricas de suma de ángulos,

$$F_{f1} = \frac{S_1 \sin(\theta - \theta_1) + F_{f2}}{\cos(\theta - \theta_1)} \quad (D4.6)$$

Pero $(\theta - \theta_1) = (\theta_1 + \theta_2 - \theta_1) = \theta_2$,

$$F_{f1} = \frac{S_1 \sin(\theta_2) + F_{f2}}{\cos(\theta_2)} \quad (D4.7)$$

Remplazando S1 de (3.24b) en la ecuación anterior (D4.7), y despejando F_{f1} ,

$$F_{f1} = \frac{\frac{W + F_{f1} \sin\theta_1}{\cos\theta_1} \cdot \sin(\theta_2) + F_{f2}}{\cos(\theta_2)} \quad (D4.8)$$

$$F_{f1} \cos(\theta_2) = \frac{W \sin(\theta_2) + F_{f1} \sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_2)}{\cos\theta_1} + F_{f2}$$

$$F_{f1} \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_1 = W \sin(\theta_2) + F_{f1} \sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_2) + F_{f2} \cos\theta_1$$

$$F_{f1} \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_1 - F_{f1} \sin\theta_1 \cdot \sin(\theta_2) = W \sin(\theta_2) + F_{f2} \cos\theta_1$$

$$F_{f1} = \frac{W \sin(\theta_2) + F_{f2} \cos\theta_1}{\cos\theta_2 \cdot \cos\theta_1 - \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2} \quad (D4.9)$$

Considerando que los ángulos son pequeños, se asume que $\cos\theta_1 \approx \cos\theta_2 \approx 1$ y también que $\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 = 0$, se tiene

$$F_{f1} = \frac{W \sin(\theta_2) + F_{f2} \cdot 1}{1 - 0}$$

$$F_{f1} = W \sin\theta_2 + F_{f2} \quad (D4.10)$$

Además, se remplaza $\sin\theta_2 = u_2/R_{ef2}$ de la ecuación (3.22b), en la ecuación (D4.10),

$$F_{f1} = \frac{W}{R_{ef2}} u_2 + F_{f2}$$

Esta última ecuación se remplaza en la ecuación (3.25), obteniéndose:

$$F = \frac{W}{R_{ef1}} u_1 + \frac{W}{R_{ef2}} u_2 + F_{f2}$$

$$F = W \left(\frac{u_1}{R_{ef1}} + \frac{u_2}{R_{ef2}} \right) + F_{f2} \quad \text{l. q. q. d.} \quad (\text{D4.11}) \text{ ó } (3.26)$$

Demostración 5

Se realiza la demostración de la ecuación (3.29). Ecuación general que gobierna el movimiento en la Fase II.

Ecuaciones de referencia:

De la ecuación (3.18)

$$u_3 = (F - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W}$$

De la ecuación (3.25)

$$u_1 = (F - F_{f1}) \frac{R_{ef1}}{W}$$

De la ecuación (3.27)

$$u_2 = (\mu_1 - \mu_2) R_{ef2}$$

$$u = u_1 + u_2 + u_3 \quad (3.28)$$

Sustituyendo estas ecuaciones en (3.28):

$$u = (F - F_{f1}) \frac{R_{ef1}}{W} + (\mu_1 - \mu_2) R_{ef2} + (F - F_{f3}) \frac{R_{ef3}}{W} \quad (\text{D5.1})$$

Despejando F,

$$F = \frac{W}{R_{ef1} + R_{ef3}} u + \frac{F_{f1}(R_{ef1} - R_{ef2}) + F_{f2}R_{ef2} + F_{f3}R_{ef3}}{R_{ef1} + R_{ef3}} \quad \text{l. q. q. d.} \quad (\text{D5.2}) \text{ ó } (3.29)$$

Anexo B: Resultados de los múltiples NLRHA desarrollados en OpenSees

Para $\mu_2 = \mu_3$:

Análisis desarrollado considerando que los coeficientes de fricción de las superficies externas son iguales ($\mu_2 = \mu_3$).

El primer aislador elegido corresponde al aislador FPT10, pero luego fue cambiado por el FPT4 con la finalidad de incrementar la capacidad de recentrado.

| FPT # | L1 | L2 | L3 | μ_1 | μ_2 | μ_3 | D_M | V_M |
|--------------|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| FPT1 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 19.3 | 0.16 |
| FPT2 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 17.1 | 0.16 |
| FPT3 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 15.7 | 0.16 |
| FPT4 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 14.7 | 0.16 |
| FPT5 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 13.8 | 0.17 |
| FPT6 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 13.3 | 0.17 |
| FPT7 | 5.5 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 20.4 | 0.12 |
| FPT8 | 5.5 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 18.3 | 0.12 |
| FPT9 | 5.5 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 16.5 | 0.12 |
| FPT10 | 5.5 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 15.0 | 0.13 |
| FPT11 | 5.5 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 13.7 | 0.13 |
| FPT12 | 5.5 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 13.4 | 0.14 |
| FPT13 | 12 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 20.3 | 0.17 |
| FPT14 | 12 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 18.2 | 0.16 |
| FPT15 | 12 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 16.9 | 0.16 |
| FPT16 | 12 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 16.0 | 0.17 |
| FPT17 | 12 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 15.3 | 0.17 |
| FPT18 | 12 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 14.9 | 0.18 |
| FPT19 | 12 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 21.5 | 0.12 |
| FPT20 | 12 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 19.8 | 0.12 |
| FPT21 | 12 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 18.2 | 0.13 |
| FPT22 | 12 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 17.0 | 0.13 |
| FPT23 | 12 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 16.1 | 0.14 |
| FPT24 | 12 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 15.4 | 0.14 |
| FPT25 | 23 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 22.1 | 0.17 |
| FPT26 | 23 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 20.1 | 0.17 |
| FPT27 | 23 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 18.8 | 0.17 |
| FPT28 | 23 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 18.0 | 0.17 |
| FPT29 | 23 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 17.4 | 0.17 |
| FPT30 | 23 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 16.8 | 0.18 |
| FPT31 | 23 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 22.6 | 0.12 |

Tabla b.1 Resultados de los NLRHA desarrollados en OpenSees, para $\mu_2 = \mu_3$

Continuación de la Tabla b.1 ...

| | | | | | | | | |
|-------|----|-------|-------|------|------|------|------|------|
| FPT32 | 23 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 21.3 | 0.12 |
| FPT33 | 23 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 20.0 | 0.13 |
| FPT34 | 23 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 18.8 | 0.13 |
| FPT35 | 23 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 18.1 | 0.14 |
| FPT36 | 23 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 17.5 | 0.15 |
| FPT37 | 33 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 23.8 | 0.18 |
| FPT38 | 33 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 22.1 | 0.18 |
| FPT39 | 33 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 21.0 | 0.18 |
| FPT40 | 33 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 20.0 | 0.18 |
| FPT41 | 33 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 19.7 | 0.18 |
| FPT42 | 33 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 19.5 | 0.19 |
| FPT43 | 33 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 23.2 | 0.12 |
| FPT44 | 33 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 22.1 | 0.12 |
| FPT45 | 33 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 21.0 | 0.13 |
| FPT46 | 33 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 20.4 | 0.13 |
| FPT47 | 33 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 20.3 | 0.14 |
| FPT48 | 33 | 151.5 | 151.5 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 20.2 | 0.15 |

Tabla b.1 Resultados de los NLRHA desarrollados en OpenSees, para $\mu_2 = \mu_3$

Para $\mu_2 < \mu_3$:

Análisis desarrollado considerando que los coeficientes de fricción de las superficies externas diferentes ($\mu_2 < \mu_3$).

El aislador que finalmente se eligió corresponde al FPT9 de la siguiente Tabla.

| FPT # | L1 | L2 | L3 | μ_1 | μ_2 | μ_3 | D_M | V_M |
|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| FPT1 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 19.3 | 0.16 |
| FPT2 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.06 | 18.2 | 0.16 |
| FPT3 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.07 | 17.4 | 0.16 |
| FPT4 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.08 | 17.1 | 0.16 |
| FPT5 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.09 | 16.8 | 0.17 |
| FPT6 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.05 | 0.1 | 16.7 | 0.17 |
| FPT7 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 17.1 | 0.16 |
| FPT8 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.06 | 0.07 | 16.5 | 0.16 |
| FPT9 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.06 | 0.08 | 16.0 | 0.16 |
| FPT10 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.06 | 0.09 | 15.7 | 0.17 |
| FPT11 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.06 | 0.1 | 15.5 | 0.17 |
| FPT12 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 15.7 | 0.16 |
| FPT13 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.07 | 0.08 | 15.3 | 0.16 |
| FPT14 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.07 | 0.09 | 15.0 | 0.17 |

Tabla b.2 Resultados de los NLRHA desarrollados en OpenSees, para $\mu_2 < \mu_3$

Continuación de la Tabla b.1 ...

| | | | | | | | | |
|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| FPT15 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.07 | 0.1 | 14.7 | 0.17 |
| FPT16 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.08 | 0.08 | 14.7 | 0.16 |
| FPT17 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.08 | 0.09 | 14.3 | 0.17 |
| FPT18 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.08 | 0.1 | 14.0 | 0.17 |
| FPT19 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 13.8 | 0.17 |
| FPT20 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.09 | 0.1 | 13.5 | 0.17 |
| FPT21 | 5.5 | 83.5 | 83.5 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 13.3 | 0.17 |

Tabla b.2 Resultados de los NLRHA desarrollados en OpenSees, para $\mu_2 < \mu_3$

Anexo C: Análisis sísmico

C.1 Cálculo de los Límites de Vs, Sección 17.5.4.3 del ASCE7-16

1. La fuerza lateral requerida por la Sección 12.8 para una estructura empotrada asociada con un carga sísmica, W_s , y un periodo igual al periodo aislador, T_{M_UB} .

$$T = T_{M_UB} = 3.03 \text{ seg}$$

$$W = W_s = 8227 \text{ kips}$$

$$R = 6$$

$$I = 1.0$$

$$I_e = 1.0$$

Sección 12.8.1

$$V = C_s W$$

C_s se calcula con

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} = \frac{1.0g}{\left(\frac{6}{1.0}\right)} = \mathbf{0.167 \rightarrow 1371 \text{ kips}}$$

Pero C_s no debe exceder:

$$\blacksquare \text{ Para } T \leq T_L \text{ (3.03 < 12.0 seg)}$$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)} = \frac{0.6g}{3.03 \left(\frac{6}{1.0}\right)} = \mathbf{0.033 \rightarrow 272 \text{ kips}}$$

C_s no debe ser menor que:

$$C_s = 0.044 S_{DS} I_e = 0.044(1.0g)(1.0) = \mathbf{0.044 \rightarrow 362 \text{ kips} \geq 0.01}$$

Adicionalmente, para estructuras en sitios donde $S_1 \geq 0.6g$, C_s no debe ser menor que:

$$C_s = \frac{0.5 S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} = \frac{0.5(0.6g)}{\left(\frac{6}{1.0}\right)} = \mathbf{0.050 \rightarrow 411 \text{ kips}}$$

2. No aplica

3. La fuerza lateral V_{st} , calculado usando la Ecuación (C17.5.7) con V_b igual a la fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislación, usando las propiedades más altas de Upper Bound

$$V_b = 0.098 \times 10028 = 983 \text{ kips}$$

$$V_s = V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{1-2.5\beta_M} = 983 \left(\frac{8227}{10028} \right)^{1-2.5(0.28)} = \mathbf{926 \text{ kips}}$$

3a. 1.5 veces las propiedades nominales

$$V_s = 1.5\mu_{nominal}W = 1.5 \times 0.08 \times 10028 = \mathbf{1203 \text{ kips}}$$

3b. No aplica

3c. No aplica

3d. La fuerza en el desplazamiento cero de un sistema deslizando después de un ciclo dinámico completo de movimiento en D_M

$$K_M = 0.01115 \times 10028 = 112 \text{ kips/in}$$

$$K_3 = \frac{10028}{2 \times 83.5} = 60 \text{ kips/in}$$

$$V_s = (K_M - K_3)D_M = (112 - 60)15.7 = \mathbf{816 \text{ kips}}$$

Por lo tanto, V_s no debe ser en ningún caso menor a 1203 kips.